EDN: VOAFHD DOI: https://doi.org.10.65912/2782-5507.2026.23.4.006

УДК 621.396.6:621.372.852 *2.2.8*

СКВОЗНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НА ПРИНЦИПАХ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ОБЛАСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

А.А. Малыгин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

Российская Федерация, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский проспект,
д. 24-26/49, литер А

Аннотация. Статья посвящена краткому рассмотрению метода молекулярного наслаивания (МН) и перспективам его применения для создания твердофазных материалов различного функционального назначения. Приведены принципы метода МН, на базе которых разработана сквозная химическая нанотехнология. Выявленные структурно-размерные эффекты в продуктах, синтезированных указанным методом, лежат в основе химического конструирования новых материалов с заданными свойствами. Рассмотрены в качестве примеров применение метода МН для регулирования свойств мембранных каталитических реакторов, а также при создании полимерных электретных материалов и их использовании в качестве фильтрующих элементов в устройствах для улавливания пыли. Представлены основные направления исследований, развивающиеся в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте на кафедре химической нанотехнологии и материалов электронной техники совместно с Первым всероссийским инжиниринговым центром технологии молекулярного наслаивания, по созданию твердофазных материалов различного функционального назначения и оборудования для их получения применительно к различным отраслям промышленности.

Ключевые слова: молекулярное наслаивание, поверхность, твердофазные материалы, функциональные свойства, сквозная нанотехнология, области применения.

Введение

Поверхность твердого тела, являясь одной из важнейших его характеристик, всегда привлекала внимание как физиков, так и химиков в качестве объекта исследования, регулируя состав и строение которой можно в широких пределах изменять свойства твердофазных материалов. И это не удивительно, т.к. именно через границу раздела «твердое – газ (жидкость, твердое)» осуществляются различные виды химических, термических, механических, оптических, радиационных и иных воздействий на твердое тело в целом.

Развитие работ в области нанотехнологий и создаваемых с их использованием наноматериалов дало новый импульс исследованиям, связанным с поверхностью твердых тел. С одной стороны, это связано с существенным возрастанием доли поверхностных атомов в наноразмерных частицах и, как следствие, их влиянием на свойства материалов. А с другой стороны, возникла острая необходимость создания новых способов формирования различных видов наноструктур (пленки, кластеры, функциональные группы) на поверхности твердофазных матриц. Объекты такого рода представляют несомненный интерес при создании материалов различного назначения: гетерогенные катализаторы, модифицированные сорбенты, оболочковые пигменты и наполнители композиционных материалов, функциональные покрытия в микро- и наноэлектронике, оптике, сенсорике и др.

Одним из динамично развивающихся направлений в области получения широкого спектра твердофазных наноматериалов является созданный в шестидесятые годы прошлого века советскими учеными В.Б. Алесковским и его учеником С.И. Кольцовым метод молекулярного наслаивания [1 - 3].

Основная идея метода МН состоит в последовательном наращивании монослоев структурных единиц заданного химического состава и строения на поверхности твердофазной матрицы за счет реализации химических реакций между функциональными группами твердого тела и подводимыми к ним реагентами в условиях максимального удаления от химического равновесия. При этом процесс носит самоорганизующийся характер, т.к. после вступления в реакцию всех доступных функциональных групп на поверхности подложки формируется не более одного мономолекулярного слоя вещества. Процесс осуществляют чаще всего в газовой фазе при атмосферном давлении или в вакууме. На рис. 1 представлены основные принципы метода МН.

Методом МН возможно синтезировать на поверхности твердофазной матрицы как наноструктуры различного химического состава (монослои, в том числе, многокомпонентные), так и осуществлять поатомную химическую сборку поверхностных нано-, микро- и макроструктур путем многократного чередования химических реакций по заданной программе [3 - 5].

Наиболее широко в качестве реагентов в процессах МН находят применение летучие галогениды или органические соединения различных элементов в сочетании с другими веществами.



Рис. 1. Метод молекулярного наслаивания

Если для формирования с использованием галогенидов на поверхности твердых тел оксидных наноструктур в качестве второго реагента применяют пары воды, озон (источник кислорода), то для получения сульфидных, нитридных, углеродных поверхностных наноструктур вместо H_2O обработку проводят, например, парами сероводорода, аммиака, метана.

Метод МН получил широкое международное признание с начала восьмидесятых годов прошлого века и в настоящее время, известный за рубежом под названием *атомно-слоевое осаждение* – АСО (Atomic Layer Deposition – ALD), является одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся направлений в микро- и наноэлектронике в таких странах, как Финляндия, США, Германия, Япония, Китай, Южная Корея и др. [3, 5 - 9].

Важное значение при решении задач прикладного характера имеют обнаруженные в продуктах, полученных методом МН, структурно-размерные эффекты (рис. 1): *эффект монослоя*, т.е. резкое, скачкообразное изменение свойств твердофазного материала после нанесения от 1 до 4 монослоев новых структурных единиц; *эффект перекрывания подложки*, когда образуется слой, толщиной свыше 4-6 монослоев, физически экранирующий поверхность матрицы; *эффект взаимного согласования* структуры поверхности подложки и наращиваемого слоя, что позволяет регулировать скорость и направление фазовых трансформаций в системе «ядро-поверхностная структура»; *эффект многокомпонентной системы,* обеспечивающий возможность синтеза сложных, в том числе, синергических композиций.

Анализируя возможные направления прикладных исследований, связанных с применением метода МН для создания твердофазных материалов с улучшенными характеристиками, представляется целесообразным классифицировать их с учетом выявленных структурно-размерных эффектов.

Весьма эффективным представляется применение эффекта монослоя в объектах, где требуется на достаточно развитой поверхности (от единиц до сотен метров квадратных на грамм) равномерно распределить и прочно закрепить малые количества - от долей монослоя до нескольких монослоев - легирующих добавок различного целевого назначения (активирующие или ингибирующие физико-химические превращения матрицы, защитные, упрочняющие, диэлектрические, проводящие и др.). К таким материалам, в первую очередь, относятся катализаторы, сорбенты, высокодисперсные наполнители композиционных материалов, порошки для синтеза керамических материалов, пигменты и ряд других.

В последние годы активно развиваются исследования по применению эффекта монослоя для регулирования энергетических, электретных характеристик различных полимерных пленочных материалов [10, 11].

Говоря об эффекте перекрывания подложки, можно отметить, что он является наиболее привлекательным при создании оболочковых (керновых) пигментов и наполнителей, а также при формировании достаточно толстых (десятки и сотни нанометров) функциональных покрытий при синтезе, например, диэлектрических покрытий в микроэлектронике, электролюминесцентных структур, сенсорных материалов и др. [12 - 14].

Эффект взаимного согласования структур синтезируемого нанослоя и матрицы может существенно влиять на фазовые превращения как матрицы, так и наращиваемого слоя, увеличивая скорость твердофазных реакций в системе. Например, исследование фазовых превращений в нанокомпозиции «оксид алюминия (дисперсная матрица) - оксид кремния (нанопокрытие)» в сравнении с механической смесью аналогичного состава показало, что скорость образования муллита в наноструктурной композиции происходит полностью за несколько минут [30]. В продуктах аналогичного состава, полученных механическим смешением оксидов кремния и алюминия, степень превращения достигает лишь 0.4 при значительно большем времени [3 - 5,12, 15].

Применение эффекта многокомпонентной системы, как и эффекта монослоя, представляет несомненный интерес при реализации нанотехнологии МН для создания гетерогенных катализаторов, при синтезе на поверхности полимеров синергических огнегасящих наноструктур, электретных и сенсорных материалов и др. [12, 13, 15, 16].

Особенно важен эффект многокомпонентной системы при создании полифункциональных нанопокрытий в составе многофазных продуктов. Такие задачи часто приходится решать при конструировании композиционных материалов, когда необходимо получить объект с заданными свойствами при сочетании наполнителя со связующим.

Следует отметить, что, в зависимости от функционального назначения и вида объекта модифицирования, выявленные структурно-размерные эффекты могут проявляться как в виде изменения химических свойств твердофазной матрицы, так и в трансформации ее геометрических размеров и других параметров. При этом процесс формирования целевого продукта может сопровождаться проявлением одновременно нескольких видов структурно-размерных эффектов. В качестве примера можно привести применение эффектов монослоя, многокомпонентной системы и перекрывания поверхности подложки при оптимизации характеристик мембранных каталитических реакторов. На рис. 2 представлена схема такого реактора, который состоит из пористой керамической трубки, размещенной в металлическом обогреваемом корпусе.

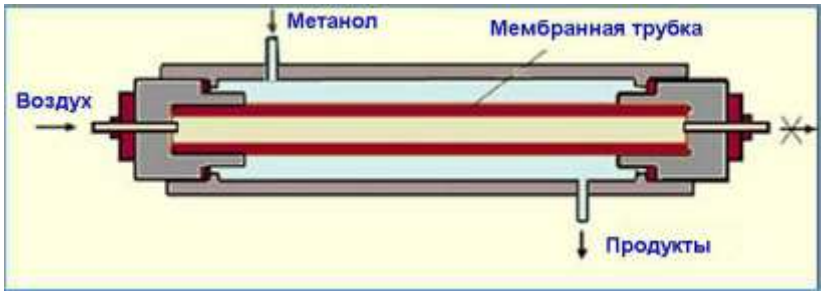


Рис. 2. Схема каталитического трубчатого мембранного реактора

Нанесение титаноксидных покрытий разной толщины на поверхность каналов керамической мембраны позволяет регулировать их транспортные характеристики (рис. 3): с увеличением числа циклов обработки парами тетрахлорида титана и воды по методу МН проводимость по газам водород, гелий и аргон снижается с увеличением количества циклов обработки парами указанных реагентов. В данном случае проявляется эффект перекрывания поверхности подложки.

В дальнейшем на модифицированной поверхности можно синтезировать, например, ванадий - оксидный монослой или двухкомпонентное фосфор-ванадий оксидное покрытие по реакциям (1,2).

$$3(\equiv Zr\text{-}OH) + VOCl_3 \rightarrow (\equiv Zr\text{-}O\text{-})_3VO + 3\ HCl\ , \quad (1)$$

$$(\equiv Zr\text{-}O\text{-})_3VO + PCl_3 \rightarrow (\equiv Zr\text{-}O\text{-})3V{\leftarrow}OPCl_3\ . \quad (2)$$

Т.е. в данном случае реализуется как эффект монослоя, так и эффект многокомпонентной системы.

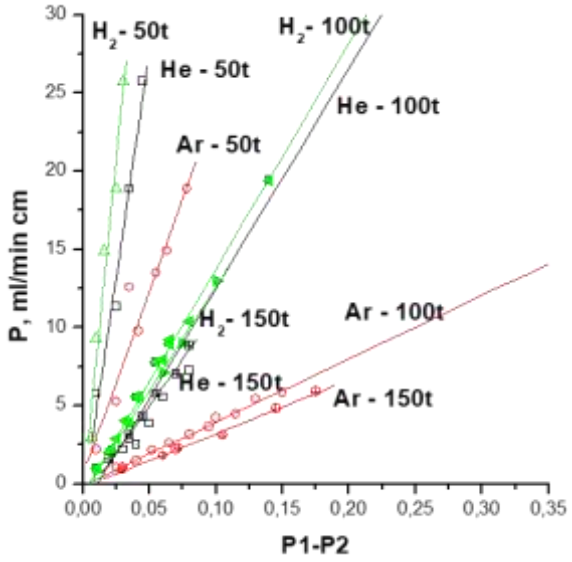


Рис. 3. Зависимость газопроницаемости от разности давлений в мембранном реакторе при различном числе циклов МН Ti-оксидного нанослоя

На рисунке 4 представлена схема процесса химической сборки в едином технологическом цикле функциональных покрытий на внутрипористой поверхности.

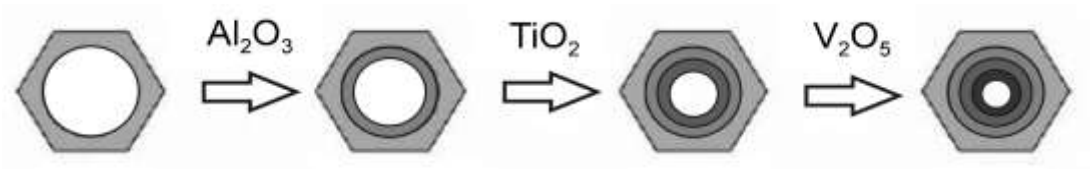


Рис. 4. Регулирование диаметра пор и осаждение каталитически активного компонента при последовательной обработке керамического мембранного реактора различными реагентами

Другой пример – это использование электретных свойств полимерных материалов для создания на их основе фильтра для улавливания пыли.

Модифицирование поверхности политетрафторэтилена (ПТФЭ) различными реагентами по принципу метода МН повышает устойчивость электретного состояния (рис. 5).
Из данных термостимулированной релаксации поверхностного потенциала следует, что наиболее стабильными электретными характеристиками обладают образцы ПТФЭ с ванадийсодержащими структурами. Это справедливо как для моно-, так и для двух-компонентных систем (проявление эффектов монослоя и многокомпонентной системы). Как следует из представленных на рис. 5 результатов, наиболее стабильным электретом является пленка ПТФЭ-V (кривая 3).

С использованием электретной пленки ПТФЭ-V была исследована ее эффективность в качестве фильтрующего материала в макете для удаления наночастиц загрязнений из газовой среды (воздуха).

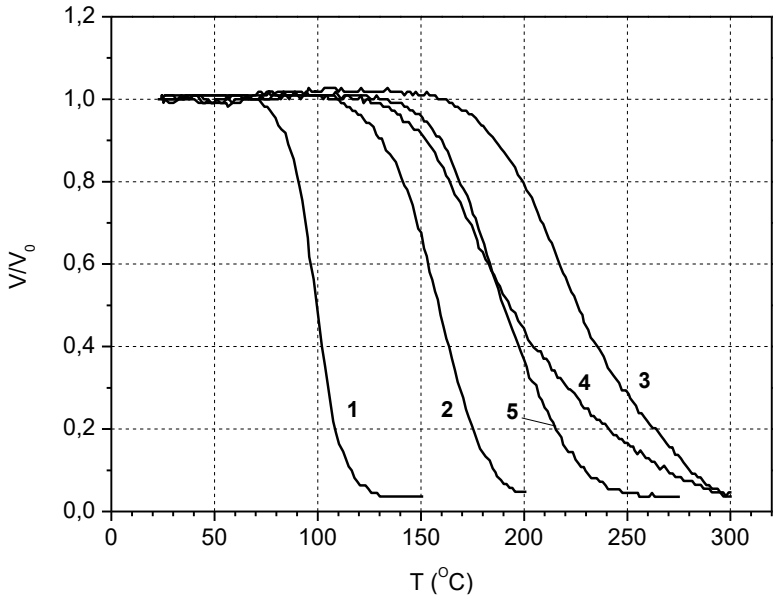


Рис. 5. Термостимулированная релаксация поверхностного потенциала в исходном и модифицированных парами оксохлоридами ванадия и фосфора образцах ПТФЭ: 1 – исходный образец; 2 – фосфорсодержащий образец; 3 – ванадийсодержащий образец; 4 – образец с системой V-P; 5 – образец с системой P-V

Схема фильтра и его характеристики представлены на рисунке 6 и в таблице 1. Электретный фильтр для кондиционирования воздуха состоит из диэлектрического корпуса (2), фильтрующей ячейки (7) и держателя фильтрующей ячейки, выполненного из непроводящего материала. Фильтрующая ячейка состоит из двух пленок ПТФЭ с нанесенными на них металлическими электродами (9), предварительно заряженных в положительном коронном разряде до начального потенциала поверхности V_0 = +215 В. Полимерные пленки закреплены в алюминиевых разъемных кольцах (8) и расположены друг напротив друга в держателе таким образом, чтобы заряженная поверхность фильтрующего материала была обращена к воздушному потоку.

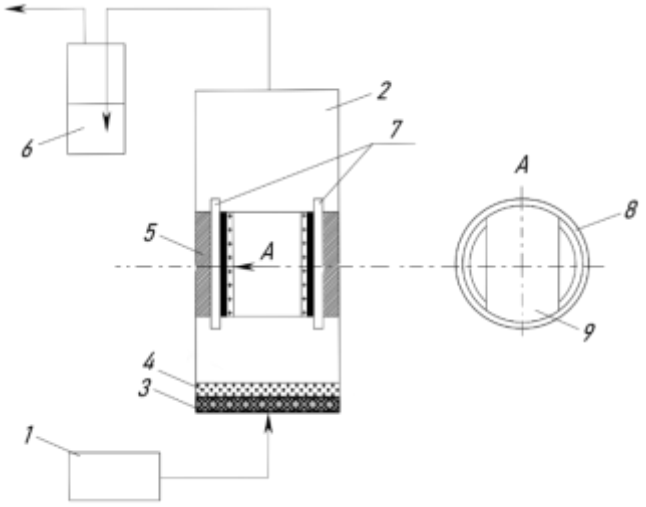


Рис. 6. Схема экспериментальной модели электретного воздушного фильтра: 1 – компрессор; 2 – корпус фильтра; 3 – стеклоткань; 4 – аэросил; 5 – держатель электретного фильтра; 6 – барботер; 7 – фильтрующая ячейка; 8 – алюминиевые разъемные кольца; 9 – фильтрующий материал

Табл. 1. Основные характеристики макета электретного фильтра

Характеристика	Значение
Объем электретного фильтра $V_ф$, м^3	$5{,}0 \cdot 10^{-4}$
Площадь фильтрующей поверхности $S_ф$, м^2	$1{,}9 \cdot 10^{-3}$
Площадь сечения воздухопровода $S_в$, м^2	$7{,}5 \cdot 10^{-4}$
Расход воздуха, поступающего на фильтр $Q_в$, м^3/ч	$6{,}0 \cdot 10^{-2}$
Воздушная нагрузка на фильтр $W_ф$, м^3/(м^2·ч)	30,8
Начальная концентрация искусственной пыли в воздухе $C_п$, г/м^3	200 г/м^3

Искусственную запыленность воздуха создавали с помощью аэросила с диаметром частиц δ = 10-40 нм (4), навеску которого располагали в нижней части корпуса фильтра под фильтрующей ячейкой (рис. 6). Для проведения ускоренных испытаний начальную концентрацию искусственной пыли в воздухе увеличили по сравнению с рекомендуемой. Во избежание попадания частиц аэросила в воздухопровод нижняя часть корпуса фильтра была проложена стеклотканью (3). Подачу воздуха в электретный фильтр и распыление аэросила осуществляли с помощью компрессора (1), избыток искусственной пыли на выходе из корпуса фильтра улавливался с помощью барботера с водой (6). Продувку электретного фильтра прекращали, когда вся навеска искусственной пыли оседала на фильтрующем материале или была уловлена барботером с водой.

Для сравнительных испытаний использовали два типа фильтрующего материала – немодифицированную пленку ПТФЭ (образец сравнения) и пленку ПТФЭ-V. Полимерные пленки взвешивали на аналитических весах до и после каждого испытания, затем вычисляли массу пыли, уловленной фильтрующим материалом. Расчет степени очистки воздуха в фильтре (эффективности фильтра) проводили по формуле:

$$\eta = \frac{G_у}{G_п} \cdot 100, \qquad ((3)$$

где $G_у$ – масса пыли, уловленной фильтрующим материалом, г; $G_п$ – масса пыли, поступившей на фильтр, г.

Пылеемкость фильтра определяли по формуле:

$$П = \frac{G_у}{S_Ф}, \qquad ((4)$$

где $G_у$ – масса пыли, уловленной фильтрующим материалом, г; $S_ф$ – площадь фильтрующей поверхности, м^2.

Для расчета эффективности и пылеемкости фильтра использовали среднее значение массы уловленной пыли.

Воспроизводимость результатов оценивали по 5 параллельным измерениям массы уловленной пыли, среднеквадратичное отклонение рассчитывали по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x - x_{ср})^2}{n \cdot (n-1)}} \qquad (5)$$

Среднеквадратичное отклонение измерений массы уловленной пыли для всех образцов составляло не более 0,008 г.

Результаты испытаний электретного фильтра с двумя типами фильтрующего материала представлены в таблице 2.

Табл. 2. Результаты испытаний экспериментальной модели электретного фильтра

Фильтрующий материал	Масса уловленных частиц G_y, г	Эффективность фильтра η, %	Пылеемкость фильтра $П$, г/м^2
ПТФЭ исх.	0,0142±0,008	14,2	7,3
ПТФЭ-V	0,0276±0,004	27,6	14,2

Согласно полученным данным, использование пленки ПТФЭ-V, модифицированной ванадийоксидными структурами, вместо исходного ПТФЭ в условиях ускоренных испытаний позволило повысить эффективность электретного фильтра и его пылеемкость, практически, в два раза.

Рассмотренные области применения нанотехнологии МН свидетельствуют о ее ярко выраженном междисциплинарном характере, что находит отражение в возможности создания широкого спектра материалов для различных отраслей промышленности. Важность развития работ по широкому внедрению химической нанотехнологии МН особенно актуальна в связи с Постановление Правительства Российской Федерации от 31.07.2025 № 1141 «Об отдельных вопросах развития сквозных технологий», в котором отмечено, что «Белый дом формализовал отношения между государством и компаниями в развитии сквозных, то есть применимых в разных отраслях, технологий».

При решении вопросов, связанных с коммерциализацией того или иного вида материала, необходимым этапом работы должно быть создание соответствующего технологического оборудования.

В исследованиях по разработке установок для химической сборки материалов методом МН можно выделить три основных направления [5, 15, 17 - 19]:

1) проточная нанотехнология, преимущественно, для модифицирования высокодисперсных и пористых материалов (неорганические и органические наполнители, пигменты, пористые сорбенты, носители гетерогенных катализаторов, люминофоры, порошки для синтеза керамики, волокна и др.), характеризующиеся развитой поверхностью и большим отношением величины поверхности к объему;

2) вакуумная (комбинированная вакуумно-проточная) нанотехнология для получения материалов полупроводниковой техники, тонких пленок в нано-, микро- и оптоэлектронике и т.п., т.е. процессы, где в качестве матриц используют объекты с большим отношением объема к величине поверхности;

3) установки ускоренного процесса МН для создания достаточно толстых (сотни нанометров) функциональных покрытий на поверхности плоских подложек.

Рисунок 7 иллюстрирует взаимосвязь создаваемых методом МН твердофазных материалов различного функционального назначения и предпочтительным видом технологического оборудования в зависимости от характеристик используемых подложек.

С учетом изложенных общих подходов к развитию метода молекулярного наслаивания и перспективным областям его практического применения на кафедре химической нанотехнологии и материалов электронной техники (ХНиМЭТ) совместно с Первым всероссийским инжиниринговым центром технологии молекулярного наслаивания (ИЦТМН) проводится комплекс междисциплинарных исследований, включающих следующие основные направления:

1. Создание «умных» материалов, имеющих отклик на воздействие внешних компонентов из окружающей среды) [5, 13, 15, 20 - 22]:

- синтез и исследование возможности применения цветового индикатора влажности на основе силикагеля с монослоем ванадийоксидных групп на поверхности для контроля сроков хранения продукции, а также перспективы его использования для получения отклика при контакте с парами аммиака, сероводорода;



Рис. 7. Твердофазные материалы, создаваемые методом МН применительно к различным отраслям, и вид необходимого технологического оборудования.

- создание газочувствительных хеморезистивных датчиков, селективных к воздействию кислорода, диоксида азота и других газов-аналитов;

- создание функциональных нанопокрытий на поверхности кварцевых оптических волокон для регулирования свойств волоконно-оптических датчиков на их основе.

- получение тонкопленочных электролюминесцентных материалов, люминесцентных сорбентов на основе кремнезема с цинксульфидным слоем, легированным активаторами (медь, марганец);

2. Мембранные каталитические реакторы и гетерогенные катализаторы для нефтегазовой отрасли [5, 13, 15, 23 - 25]:

- фосфор-ванадиевые катализаторы на основе кремнезема и оксида алюминия для окислительного дегидрирования метана, метанола;

- титан-, ванадий-, молибден-, ниобий –оксидные добавки на поверхности пористого кремнезема, оксида алюминия, пористой керамической мембраны для процессов окислительного дегидрирования, превращения этана в этилен и других процессов;

3. Формирование нанопокрытий на поверхности керамических материалов [5, 13, 15, 30]:

- оксидные керамические материалы (оксиды кремния, титана, магния, циркония, алюминия) с привитыми к поверхности наноструктурами (оксидные добавки титана, ванадия, хрома и др.), обеспечивающими снижение температуры спекания, повышение плотности и др. характеристик целевых продуктов;

- создание нанопокрытий на поверхности бескислородной керамики (карбид кремния, нитрид бора), обеспечивающих повышенную термоокислительную стойкость и механическую прочность при температурах 1500 С;

- введение добавок в состав твердосплавной шихты на основе карбида вольфрама для предотвращения роста зерен и деградации карбида вольфрама в процессе высокотемпературной обработки при создании режущих инструментов.

4. Проведение поисковых исследований по регулированию функциональных свойств полимерных материалов [5, 10, 11, 13, 15]:

- оптимизация состава добавок, обеспечивающих стабилизацию поверхностного заряда при создании полимерных электретных материалов, прививка оксидных добавок титана, фосфора, ванадия, хрома, а также их сочетаний к поверхности полимерных матриц (полиэтилен, политетрафторэтилен и др.) с целью стабилизации электретного состояния;

- модифицирование фенолоформальдегидных и других видов полимеров с целью снижения их горючести;

5. Создание функциональных нанопокрытий на поверхности различных видов стеклянных матриц [5, 13, 15, 26, 27]:

- исследование влияния вида стеклянной матрицы (оптический кварц, флоат стекло, стекло марки СТ-21) на формирование оксидных нанопокрытий титана, алюминия, циркония;

- исследование оптических свойств синтезированных стекол с титаноксидными слоями;

- оценка перспектив создания гидрофобных нанопокрытий на основе алюминийоксидных нанопокрытий;

6. Получение керновых пигментов и наполнителей в системе «ядро (диоксид кремния) – функциональная оболочка» и регулирование окраски ювелирных искусственных материалов [5, 12, 13, 15]:

- белые пигменты с титаноксидными покрытиями;

- желтые пигменты с двухкомпонентыми железо-титаноксидными слоями;

- зеленые пигменты с хромоксидными нанопокрытиями;

- активатор вулканизации с цинкоксидным слоем;

- регулирование окраски искусственных опалов;

- искусственный изумруд на основе берилла и стекол с хромоксидным покрытием.

7. Создание антифрикционных, упрочняющих, защитных нанопокрытий на поверхности различных металлических матриц [5, 13, 15]:

- молибденсульфидные антифрикционные нанопокрытия на поверхности стальных шариков: отработка режимов синтеза, методик испытания;

- упрочняющие алюминийоксидные нанопокрытия на стальных подложках;

- защитные титаноксидные нанопокрытия на поверхности серебряных изделий для защиты от серосодержащих газовых сред;

- синтез танталоксидных покрытий для создания электретного заряда на поверхности металлических имплантов.

8. Построение комплексных квантовохимических и реактивных молекулярно-динамических моделей для прогнозирования поведения наносистем и их экспериментальная валидация, а также использование методов искусственного интеллекта (хемометрика) для обработки и интерпретации экспериментальных данных, что позволит оптимизировать процессы синтеза методом МН продуктов с заданным составом, строением и функциональными свойствами [5, 13, 15, 28, 29].

9. Разработка и изготовление автоматизированных лабораторных установок молекулярного наслаивания для проведения экспериментальных исследований и обеспечения образовательного процесса [18, 19]:

- разработка документации на установки проточного и проточно-вакуумного типа;
- разработка программного обеспечения для установок МН;
- изготовление и испытание действующих макетов установок МН.

В настоящее время кафедра ХНиМЭТ и ИЦТМН в СПбГТИ(ТУ) в кооперации с ООО «ИЦМН», АО «СКТБ Кольцова» выполняет весь цикл НИОКР/ОТР от создания по технологии МН востребованных промышленностью инновационных материалов различного функционального назначения до изготовления и поставки оборудования для их производства.

Список литературы

1. Алесковский В.Б. О химии и технологии твердых веществ / В.Б. Алесковский // Журнал прикладной химии. – 1974.– Т. 47. – Вып. 10. – С. 2145-2149.
2. Алесковский В.Б. Стехиометрия и синтез твердых соединений. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л., 1976. – 140 с.
3. Malygin A.A. From V. B. Aleskovskii's "Framwork" Hypothesis to the Method of Molecular layering / Atomic Layer Deposition / A.A. Malygin, V.E. Drozd, A.A. Malkov, V.M. Smirnov // Chemical Vapor Deposition. – 2015. – V. 21. – № 10-12. – P.216-240.
4. Соснов Е.А. Нанотехнология молекулярного наслаивания в производстве неорганических и гибридных материалов различного функционального назначения (обзор). I. История создания и развитие метода молекулярного наслаивания / Е.А. Соснов, Малков А.А., Малыгин А.А. // Журнал прикладной химии. – 2021. – Т.94, № 8. – С.967-985
5. Соснов Е.А. Нанотехнология молекулярного наслаивания в производстве неорганических и гибридных материалов различного функционального назначения (обзор). II. Технология молекулярного наслаивания и перспективы ее коммерциализации и развития в XXI веке / Е.А. Соснов, А.А. Малков, А.А. Малыгин // Журнал прикладной химии. – 2021. – Т.94, № 9. – С.1104-1137.
6. Riikka L. Puurunen. Surface chemistry of atomic layer deposition: A case study for the trimethylaluminum / water process / Riikkaм L. Puurunen // Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 97. – P. 121301-1 – 121301-52.
7. Kristina Ashurbekova and Mato Knez. Atomic Layer Processing (ALP): Ubi es et Quo Vadis? Adv. Mater. Interfaces 2024, 2400408.
8. Sangwon Lee, Gyuha Lee, Jeongmin Oh, Jihwan An. Novel Atomic Layer Processes for Semiconductor Manufacturing: Area Selective Deposition, Atomic Layer Annealing, and Atomic Layer Etching Received: 10 June 2025 / Revised: 28 July 2025 / Accepted: 12 August 2025 © The Author(s) 2025
9. Peter M. Piechulla. Atomic Layer Deposition on Particulate Materials from 1988 through 2023: A Quantitative Review of Technologies, Materials, and Applications / Peter M. Piechulla, Mingliang Chen, Aristeidis Goulas, Riikka L. Puurunen, and J. Ruud van Ommen // Chemistry of Materials. – 2026. – 38. – 1. – P. 20–86. DOI: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.5c01919
10. Новожилова Е.А. Электретные материалы на основе фторполимеров, модифицированных ванадий- и фосфорсодержащими структурами / Е.А. Новожилова, А.А. Малыгин, Рычков А.А., Кузнецов А.Е. //Журнал прикладной химии. – 2021. – Т.94, № 6. – С.767-777.
11. Патент RU 2812339. СПК H01G 7/02; B82B 3/00 (2023.08). Способ изготовления электретного материала / Е.А.Новожилова, К.А.Корсакова, А.А.Малыгин, А.Е.Кузнецов. – № 2023118744; заявл. 16.07.2023; опубл. 30.01.2024 // Бюл. 2024.- № 4.- 11 с.
12. Малыгин А.А. Нанотехнология молекулярного наслаивания (обзор) / А.А. Малыгин // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2. – №№ 3-4, апрель. – С. 87 – 100.

13. Малыгин А. А. Технология молекулярного наслаивания и некоторые области ее применения /А.А. Малыгин // Журнал прикладной химии. – 1996. – Т. 69, № 10. – С. 1585-1593.
14. Рогов А.М. Оптические кварцевые волокна с функциональными титаноксидными нанопокрытиями / А.М. Рогов, Т.С. Павленко, А.А. Малыгин // Известия СПбГТИ(ТУ). – № 8 (34). – 2010. – С. 38 – 41.
15. Малыгин А.А., Малков А.А., Соснов Е.А. Ведущая научная школа В.Б. Алесковского “Химия высокоорганизованных веществ”: от фундаментальных исследований к широкой практической реализации // Журнал неорганической химии. – 2024. – Т.69, № 3.– С.294-310.
16. Malygin A.A. Journal of Industrial Engineering Chemistry. – V. 12, No 1. – 2006. – P. 1 – 11.
17. Ежовский Ю.К. От микро- к наноэлектронике на основе химической нанотехнологии молекулярного наслаивания / Ю.К. Ежовский, А.А. Малыгин // Петербургская – Ленинградская школа электроники. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ П29 «ЛЭТИ», 2013. – С. 422 – 427.
18. Малыгин А.А. Оборудование процесса химической сборки материалов // Малыгин А.А., Ежовский Ю.К. // Учеб. пособие. - Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1987. - 96 с.
19. Кольцов С.И. Химическое и нефтяное машиностроение, научно-технический реф. сб. / С.И. Кольцов, С.В. Кучеров, В.Ф. Дергачев и др.// МХП, М. – 1983. – № 6. – С.1 – 2.
20. Способ контроля сроков хранения продукции. Патент RU 2021128623 29.09.2021. РФ. 2798829. 28.06.2023
21. Патент RU 2825720. СПК G01N 27/125 (2024.01). Способ получения газочувствительного покрытия на поверхности рабочего элемента датчика для детектирования NO2 / А.А. Малыгин, Н.В. Захарова. – № 2024110496; заявл. 17.04.2024; опубл. 28.08.2024 // Бюл. 2024. – № 25. – 10 с.
22. Малыгин А.А., Бюймистрюк Г.Я. Технологии молекулярного наслаивания — основа оптико-электронной сенсорики повышенной надёжности // Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the XXX Anniversary Seminar NPCS’2023, Minsk, June 19-23, 2023 / Ed. by V.A. Shaporov, A.G. Trifonov.- Минск: Право и экономика, 2023.- С.458-466.
23. Malygin A.A. Membranes Prepared via Molecular Layering Method / A.A. Malygin, A.A. Malkov, S.V. Mikhaylovskiy et al. // Membranes for Membrane Reactors: Preparation, Optimization and Selection. Ed. by A.Basile and F.Gallucci.– Wiley, 2011. – P.357-369.
24. Жиляева Н.А. Окислительное дегидрирование этана с использованием ванадий-фосфорсодержащих систем на оксидных носителях. / Н.А. Жиляева, В.И. Елизарова, Е.Ю. Миронова и др. // Журнал неорганической химии.– 2023.– Т.68, № 1.– С.96–104
25. Zhilyaeva N.A. Oxidative Dehydrogenation of Ethane on Titanium and Vanadium Oxides Deposited on SiO2 by Molecular Layer Deposition and Selective Separation of Ethylene from the Resulting Mixture / N.A. Zhilyaeva, E.Yu. Mironova, A.A. Malkov et al. // Membranes and Membrane Technologies. – 2025. – V. 7, No 1. – P. 57-66. DOI: https://doi.org/10.1134/S2517751625600190
26. Москалев А.В. Морфология поверхности различных матриц с цирконийоксидными покрытиями, синтезированными путем попеременной обработки поверхности парами трет-бутоксида циркония(IV) и воды / А.В. Москалев, В.В. Антипов, А.С. Ципанова, А.А. Малыгин // Журн. общей химии. – 2024. – Т. 94, № 1. – С.122-135.
27. Москалев А. В. Фотокаталитические свойства кварцевого стекла с титаноксидными покрытиями различной толщины, синтезированными методом молекулярного наслаивания / А. В. Москалев, А. С. Саратовский, А. А. Малыгин // Физика и химия стекла. – 2025. – том 51, № 6. – С. 737–747
28. Дубровенский С.Д. Квантово-химические подходы к идентификации наноструктур, синтезируемых методом молекулярного наслаивания / С.Д. Дубровенский, А.А. Малыгин // Росс. Хим. журн. – 2009. – Т. LIII, № 2. – С. 98-110.

29. Quantum Chemical Simulation of Polycondensation Processes of Vanadium Oxide Structures on Silica Surface/ E. O. Drozdov, D. V. Buzina, A. A. Malkov, and A. A. Malygin// Russian J. of General Chemistry. – 2022. – Vol. 92, No. 12. – P. 2870–2876.
30. Гусаров В.В. Особенности твердофазной химической реакции образования муллита в наноразмерной пленочной композиции / В.В. Гусаров, Ж.Н. Ишутина, А.А. Малков, А.А. Малыгин //ДАН. – 1997. – Т. 357, N 2. – С. 203-205.

END-TO-END TECHNOLOGY BASED ON THE PRINCIPLES OF THE MOLECULAR LAYERING METHOD AND SOME AREAS OF ITS APPLICATION

A.A. Malygin

St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

24-26/49, building A, Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 190013, Russian Federation

Absrtact. The article is devoted to a brief review of the molecular layering (MN) method and the prospects of its application for the creation of solid-phase materials for various functional purposes. The principles of the MN method are given, on the basis of which end-to-end chemical nanotechnology has been developed. The revealed structural and dimensional effects in products synthesized by this method underlie the chemical design of new materials with specified properties. The application of the MN method to regulate the properties of membrane catalytic reactors, as well as in the creation of polymer electret materials and their use as filter elements in dust capture devices, are considered as examples. The main research directions developing at the St. Petersburg State Technological Institute at the Department of Chemical Nanotechnology and Electronic Engineering Materials in cooperation with the First All-Russian Engineering Center for Molecular Layering Technology on the creation of solid-phase materials for various functional purposes and equipment for their production in various industries are presented.

Keywords: molecular layering, surface, solid-phase materials, functional properties, end-to-end nanotechnology, application areas.

Материалы представлены на Научно-практическом семинаре с международным участием «Актуальные научные и прикладные задачи в области фильтроматериалов» (г. Казань, 17-18 августа 2026 года).

Статья представлена в редакцию 21 августа 2026 г.