

НОВЫЕ РЕАГЕНТЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННЫХ ОСАДКОВ: ГИБРИДНЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ AgI-SiO₂

А.С. Аверкина, *Институт технической химии УрО РАН*

А.Ш. Шамсутдинов, *Институт технической химии УрО РАН*

Н.Б. Кондрашова, *Институт технической химии УрО РАН*

И.В. Вальцифер, *Институт технической химии УрО РАН*

В.А. Вальцифер, *Институт технической химии УрО РАН*

В.Н. Стрельников, *Институт технической химии УрО РАН*

Для цитирования:

Аверкина А.С., Шамсутдинов А.Ш., Кондрашова Н.Б., Вальцифер И.В., Вальцифер В.А., Стрельников В.Н. Новые реагенты для технологий искусственных осадков: гибридные порошковые материалы AgI-SiO₂ // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 3. – С. 6–14. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.3.1>

Методом гидротермальной темплатной соконденсации (далее метод «ГТС») синтезированы гибридные порошковые материалы (далее «ГПМ») типа AgI-SiO₂, где SiO₂ – мезопористый мезофазный диоксид кремния MCM41 (далее AgI-MCM41), имеющие высокий потенциал применения в технологиях искусственных осадков. Исследована взаимосвязь между концентрацией прекурсоров диоксида кремния и иодида серебра и морфологическими, структурно-текстурными и реологическими характеристиками синтезированных гибридов AgI-SiO₂. Наибольшее внимание уделено формированию гексагональной кристаллической структуры (β-формы, Iodargyrite) иодида серебра и сохранению максимальной развитости (высоких значений удельной площади поверхности) для системы AgI-MCM41. Методом сканирующей электронной микроскопии изучено фазовое состояние AgI и MCM41 в составе гибрида. Дана оценка оптимального компонентного соотношения, необходимого для формирования гексагональной структуры иодида серебра. При исследовании развитости поверхности взяты во внимание такие параметры, как величина удельной площади поверхности, объем пор и их размер. Описаны изотермы сорбции. Морфологические особенности полученных ГПМ AgI-MCM41 изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии. Выполнено исследование ряда реологических показателей (таких как летучесть, текучесть) для синтезированных порошков, позволяющих прогнозировать их эксплуатационные свойства. Описаны конденсационные возможности синтезированных гибридных порошковых материалов AgI-MCM41.

Ключевые слова: гидротермальный синтез, порошковые материалы, гибриды, структурные свойства, текстурные свойства, реология, диоксид кремния, иодид серебра, технологии искусственных осадков.

Одним из направлений технологий искусственных осадков является «засев облаков» с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций, связанных с градобитием и потопом, вследствие чрезмерных дождей. Засев облаков – это процесс «вкрапления» в облака мельчайших посторонних частиц, таких как сухой лед, иодид серебра или даже обычная поваренная соль, с целью вызвать выпадение осадков или иным образом изменить погоду. Эта практика является достаточно распространенной как на территории Российской Федерации, так и во всем мире. Альтернативным применением «засева облаков» является использование воды, содержащейся в облаке, для тушения лесных пожаров или орошения засушливых районов [1-4].

В атмосфере Земли постоянно присутствуют крошечные частицы пыли (пыльца, минеральная крошка и т.д.). Также в воздушной оболочке земли осуществляется постоянная циркуляция теплых и холодных потоков воздуха. На взвешенных частицах пыли происходит конденсация и образование «облачной» капли. Дождевые и градовые облака образуются, когда миллиарды таких «облачных» капелек собираются вместе. Осадки выпадают в том случае, если подобные скопления становятся достаточно тяжелыми [5]. Водосодержание градовых и дождевых облаков (при объеме среднего облака 1000 м^3) составляет от 50 тонн [6, 7].

Однако дождевые и градовые облака являются достаточно устойчивыми атмосферными образованиями и длительное время могут перемещаться над поверхностью земли под действием ветра. Игнорирование большого скопления дождевых и градовых облаков над посевами может привести к гибели урожая. А пропускание так называемого «облачного» и «грозового» фронта над засушливой территорией или территорией, находящейся в пожароопасном состоянии, может являться причиной техногенной катастрофы.

«Засев облаков» предполагает распространение посторонних твердых частиц в гораздо большей концентрации, чем было

бы в естественном фоне атмосферы, что приведет к контролируемому освобождению конденсированной воды облака. «Засев облаков» может быть выполнен с помощью аэрозольных генераторов на земле, путем запуска твердотопливного заряда с наземной установки или с самолета, посредством сгорания пиротехнического состава в средстве доставки или путем распыления газо-воздушной смеси с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) [1-4, 8]. Неоспоримым преимуществом БПЛА является возможность его использования в трудных условиях (нулевая видимость при сильных туманах, задымление) по заранее заданному маршруту, контролируемому по спутниковым системам навигации GPS/ГЛОНАСС. Технические характеристики производимых на сегодняшний день БПЛА типа квадрокоптер позволяют перемещать до 10–15 кг полезной нагрузки на расстояния до 5–10 км с потолком высоты полета до 2000–3000 м. Указанных характеристик в полной мере хватает для единоразовой реализации доставки распылительной системы с реагентом в целевую область атмосферы. Еще одним немаловажным достоинством является относительная простота и низкая стоимость обслуживания БПЛА.

Часто применяемым реагентом, используемым для «засева облаков», является иодид серебра, который играет роль льдообразующего реагента [9–15]. Применение иодида серебра как льдообразующего реагента обосновано тем, что кристаллическая структура $\beta\text{-AgI}$ (типа вюрцит) похожа на структуру естественного льда Ih . По этой причине частицы $\beta\text{-AgI}$ проявляют эффективность при льдообразовании в атмосфере. На основе результатов многочисленных экспериментов удалось установить, что использование иодида серебра не оказывает неблагоприятного воздействия ни на окружающую среду, ни на человеческое здоровье.

Известно, что на засев облака среднего объема 1000 м^3 достаточно всего 5–10 г данного неорганического соединения [9–11]. Однако для этого реагента существуют

жесткие требования к характеристикам, среди которых наиболее важными являются дисперсность (от 10 до 100 нм), фазовое состояние (приоритетная β -структура), термостойчивость (способность выдерживать нагрев свыше 750°C без деструкции на металлическое серебро (или его оксид) и изменения агрегатного состояния).

Ранее авторами статьи синтезированы гибридные порошковые материалы на основе AgI и нанодисперсного оксида кремния. Полученные порошки продемонстрировали высокую эффективность во время испытаний в облачной камере, проведенных в ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (г. Долгопрудный Московской области), уполномоченном в принятии решения по оценке реагентов, используемых в технологиях искусственных осадков [16].

Таким образом, возможность повышения эксплуатационных характеристик иодида серебра становится перспективным направлением исследований. Целью данного исследования является разработка условий синтеза иодида серебра в присутствии диоксида кремния (MCM41) для формирования β -кристаллов иодида серебра дисперсностью до 50 нм в составе гибрида AgI-MCM41.

Эксперимент

Методика синтеза AgI-MCM41

Гибридные порошковые материалы AgI-MCM41 синтезированы методом «Гидротермальная темплатная соконденсация», что представляет собой синтез в гидротермальных условиях со структуроформирующим агентом. В качестве предшественника кремнеоксидной матрицы использован тетраэтоксисилан (TEOS) (98%, Sigma Aldrich). Предшественниками иодида серебра, вводимыми в реакционную смесь, являются нитрат серебра (99%, Sigma Aldrich), иодид калия (97%, Sigma Aldrich). В качестве структуроформирующего агента выбран цетилтриметиламмоний бромид (СТАВ) (98%, Sigma Aldrich), для создания щелочной среды использован гидроксид

аммония (98%, Sigma Aldrich). Выдержка реакционной смеси осуществлялась в термостатном шкафу в течение 48 часов при температуре 100°C. Соотношение компонентов в реакционной смеси $[H_2O] / [СТАВ] / [NH_4OH] = 100/0,3/10,5$. Мольная концентрация иодида калия превышает концентрацию нитрата серебра в 1,5–2,0 раза для обеспечения полноты протекания реакции. После гидротермальной выдержки образцы ГПМ AgI-MCM41 промыты, высушены, из них удален структуроформирующий агент методом прокаливания в муфельной печи при температуре 650°C в течение 5 часов. Таким образом, с помощью метода «ГТС» приготовлена серия образцов ГПМ AgI-MCM41, отличающихся соотношением $[Ag]/[Si]$ в составе гибрида: $[Ag]/[Si]=0,003$, $[Ag]/[Si]=0,009$, $[Ag]/[Si]=0,020$, $[Ag]/[Si]=0,045$, $[Ag]/[Si]=0,080$.

Методы исследования

Синтезированные образцы гибридных порошковых материалов AgI-MCM41 исследованы различными физико-химическими методами анализа.

Фазовое состояние иодида серебра в составе гибрида и характеристика кремнеоксидной матрицы исследованы методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием картотеки JSPDS. Средний размер кристаллитов был вычислен с помощью метода Селякова–Шеррера.

Морфология синтезированных гибридов описана с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Распределение кристаллов по поверхности кремнеоксидной матрицы исследовано с помощью энергодисперсионного микроанализа, совмещенного с СЭМ.

Метод низкотемпературной адсорбции-десорбции азота использован для определения текстурных свойств синтезированных образцов AgI-MCM41: удельной поверхности, размера и объема пор.

Реологические свойства гибридных порошковых материалов AgI-MCM41 исследованы путем определения показателей: естественного угла откоса, време-

ни истечения и т.д. Для определения перечисленных показателей использованы методики и стандарты, принятые на территории Российской Федерации.

Исследования способности к влагопоглощению проведены в статических и динамических условиях, согласно стандартной методике и разработанному авторами методу [16].

Обсуждение результатов

Гибридные порошковые материалы, синтезированные по предложенному методу «ГТС», представляют собой агломерированные частицы мезопористого мезофазного диоксида кремния MCM41, на поверхности которых локализованы кристаллы иодида серебра. Таким образом, иодид серебра выступает в качестве модификатора матрицы, которой является MCM41. Сами частицы модификатора прочно удерживаются на матрице благодаря электростатическим силам, Валь-дер-Вальсовому взаимодействию.

Морфология ГПС AgI-MCM41 описана с использованием сканирующего электронного микроскопа. Результаты исследования показали, что внешний вид синтезированных гибридов AgI-MCM41 полностью соответствует морфологии немодифицированного диоксида кремния типа MCM41, полученного также с помощью гидротермального синтеза в аналогичных режимах (рис. 1).

Кроме того, было установлено, что молярное соотношение $[Ag]/[Si]$ в составе гибрида не оказывает влияние на его морфологию, и внешний вид частицы синтезированного ГПС AgI-MCM41 соответствует чистому MCM41.

Результаты энергодисперсионного анализа свидетельствуют о равномерности распределения кристаллов иодида серебра по поверхности MCM41-частицы, что проявляется в совпадении областей локализации элементов Si, O, Ag, I (рис. 2).

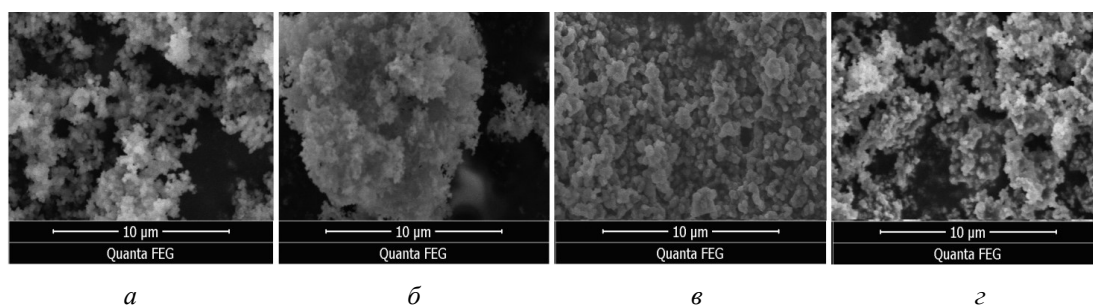


Рис. 1. Микрофотографии образцов ГПС AgI-MCM41: а – немодифицированный MCM41, б – $[Ag]/[Si]=0,003$, в – $[Ag]/[Si]=0,020$, г – $[Ag]/[Si]=0,080$

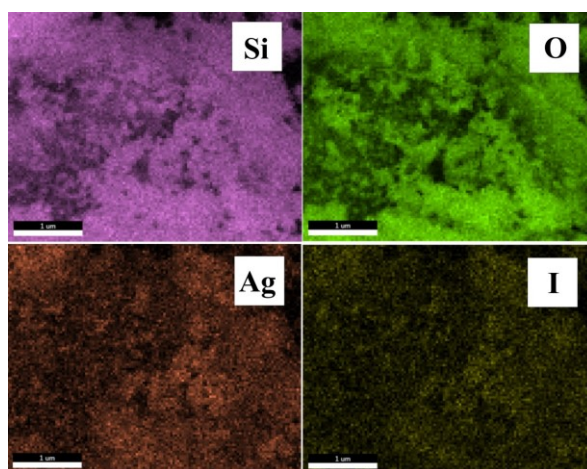


Рис. 2. Микрофотографии образцов ГПС AgI-MCM41 при $[Ag]/[Si]=0,080$. Результаты энергодисперсионного микроанализа

Результаты рентгенофазового анализа продемонстрировали, что для формирования определенной кристаллической фазы модификатора в составе гибрида AgI-MCM41 большое значение имеет мольное соотношение $[Ag]/[Si]$. Показано, что формирование кристаллических структур иодида серебра осуществляется с концентрацией $[Ag]/[Si]=0,045$ и полностью реализуется при $[Ag]/[Si]=0,080$. Об этом свидетельствуют характеристические пики на полученных рентгенограммах при 2θ равное $22-25^\circ, 33^\circ, 39^\circ, 43^\circ, 47^\circ$ (характеристические пики фазы *Miersite* (γ, α) *Iodargyrite* (β)) (рис. 3). На рис. 3 графическая пометка «кружок» фиксирует характеристический пик для формы *Iodargyrite* (β), а пометка «треугольник» – *Miersite* (γ, α).

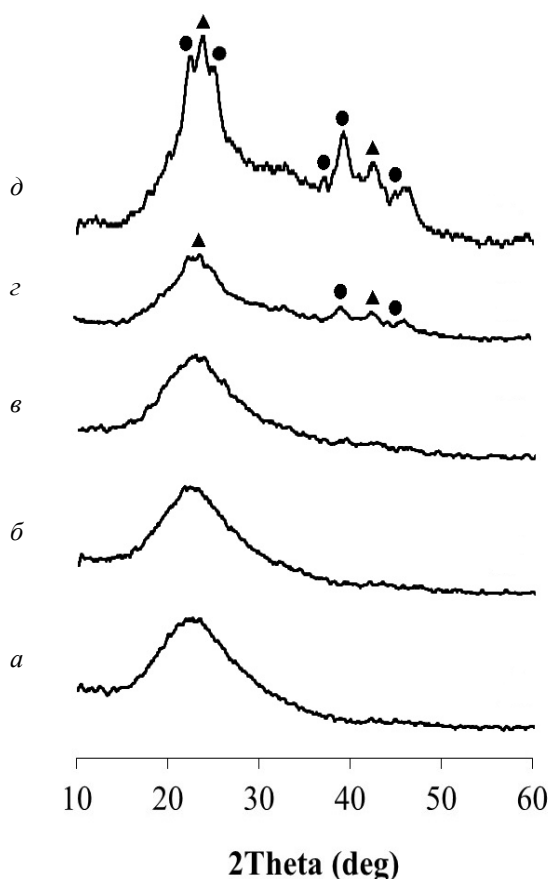


Рис. 3. Рентгенограммы образцов ГПМ AgI-MCM41:
 а – $[Ag]/[Si]=0,003$, б – $[Ag]/[Si]=0,009$,
 в – $[Ag]/[Si]=0,020$, г – $[Ag]/[Si]=0,045$,
 д – $[Ag]/[Si]=0,080$

Размеры кристаллитов, рассчитанные по уравнению Селякова – Шеррера для образцов ГПМ AgI-MCM41 при $[Ag]/[Si]=0,045$, составляют $13,52$ нм, а при $[Ag]/[Si]=0,080$ – $11,50$ нм.

Структурно-текстурные свойства полученных ГПМ AgI-MCM41 изучены методом низкотемпературной сорбции азота. Результаты исследования отражены в табл. 1. В ходе проведения экспериментов установлено, что соотношение компонентов (модификатора и матрицы) в составе гибрида оказывает существенное влияние на их характеристические особенности. Доказано, что по мере повышения содержания иодида серебра в составе гибрида AgI-MCM41 происходит снижение величины удельной площади поверхности и величины общего объема пор, что связано с частичным заполнением порового пространства кремнеоксидной матрицы кристаллами иодида серебра. Показано, что размер пор мало зависит от соотношения $[Ag]/[Si]$ в составе гибрида.

Таблица 1.

Структурно-текстурные свойства ГПМ AgI-MCM41

Соотношение $[Ag]/[Si]$	Удельная поверхность, Свет, m^2/g	Общий объем, cm^3/g	Диаметр пор, нм (десорбц.)
0,003	925	0,72	3,4
0,009	902	0,66	3,4
0,020	869	0,62	3,3
0,045	642	0,57	3,7
0,080	346	0,36	4,1

Изучение изотерм сорбции показало, что согласно международной классификации IUPAC полученные изотермы относятся к IV типу (рис.4), что соответствует наличию в образце мезопор.

Обнаружено, что полученные кривые сорбции-десорбции аналогичны для всех синтезированных гибридов AgI-MCM41. Для образцов в области $P/P_0=0,45-1$ наблюдается гистерезис, что, предположительно, может свидетельствовать о заполнении мезопор кристаллами иодида серебра и о процессах сорбции-десорбции в

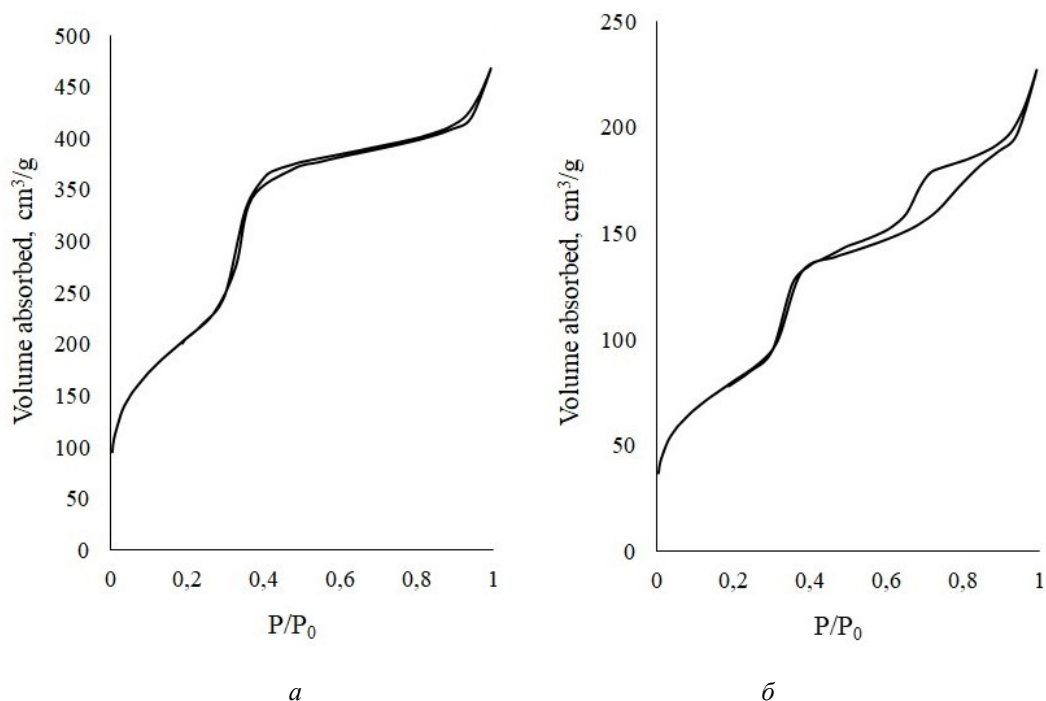


Рис. 4. Изотермы сорбции-десорбции для образцов ГПМ AgI-MCM41:
 а – $[Ag]/[Si]=0,003$, б – $[Ag]/[Si]=0,080$

микропорах. Исследование распределения пор по размерам продемонстрировало, что данный показатель лежит в узком диапазоне, и это свидетельствует об однородности порового пространства синтезированных гибридов AgI-MCM41.

Прогнозирование эксплуатационных свойств ГПМ AgI-MCM41 выполнено на основе ряда оценки реологических показателей, характеризующих текучесть, летучесть, распыляемость, влагопоглощение. Поскольку значительное внимание при синтезе гибрида уделено фазовой структуре иодида серебра в составе гибрида, то образцы с мольным соотношением $[Ag]/[Si] < 0,045$ для данного типа гибрида не представляют интерес при их использовании в качестве реагентов для технологий искусственных осадков. В табл. 2 приведены результаты определения реологических параметров для образца ГПМ AgI-MCM41 при $[Ag]/[Si]=0,080$. Выбранные методики определения [16–17] позволяют дать качественное ранжирование исследуемого реологического показателя по шкале «очень плохая – очень хорошая» и «очень низкое – очень высокое».

Таблица 2.

Реологические свойства ГПМ AgI-MCM41		
Показатель	Методика определения	Результат измерения
Сыпучесть	Определение времени истечения, угол естественного откоса [17]	Хорошая
Летучесть	Определение объемной массы, среднего размера агломерата в потоке воздуха [16]	Очень хорошая
Влагопоглощение	Определение влажности в статических условиях/динамическом режиме [16, 17]	Низкое/ Высокое

Установлено, что синтезированный гибриды AgI-MCM41 является хорошо сыпучим, легко летучим порошковым материалом, обладающим низким значением влагопоглощения в статических условиях (27,8 масс.% после 30 дней выдерживания) и способным эффективно конденси-

ровать влагу в динамическом режиме (время осаждения пересыщенного влагой объема воздуха в облачной камере 8 м³ при температуре «минус» 5°C – 45 с, при «плюс» 5°C – 90 с). Увеличение времени конденсации под действием ГПМ AgI-MCM41 при положительной температуре связано с тем, что для формирования пересыщенного состояния воздуха при температурах выше 0°C требуется большее количество воды, а соответственно, и более продолжительный процесс влагопоглощения. Следует отметить, что при использовании гибрида AgI-MCM41 происходит не только непосредственное влагопоглощение влаги из воздуха, но и стимулирование нисходящих потоков.

Заключение

Гибридные порошковые материалы AgI-MCM41 синтезированы методом «Гидротермальной темплатной соконденсации» с использованием предшественника диоксида кремния – тетраэтоксисилана и предшественников иодида серебра – нитрата серебра и иодида калия.

Установлено, что морфология частиц AgI-MCM41 в основном определяется внешним видом используемой кремнеоксидной матрицы MCM41 и не зависит от соотношения [Ag]/[Si] в составе гибрида. Показано, что распределение иодида серебра по поверхности MCM41 является

равномерным. Предположено, что закрепление и удержание кристаллов иодида серебра на поверхности и в поровом пространстве мезопористого мезофазного диоксида кремния осуществляется за счет сил Ван-дер-Ваальса, электростатических сил и т.д.

Обнаружено, что формирование рентгеноструктурного иодида серебра происходит при соотношении $[Ag]/[Si] \geq 0,045$. Ниже указанного соотношения образцы гибрида рентгеноаморфны.

Исследование структурно-текстурных характеристик показало, что существует выраженная взаимосвязь между соотношением $[Ag]/[Si]$ в составе гибрида и величиной удельной площади поверхности, и объемом пор. Установлена обратно пропорциональная зависимость между указанными параметрами.

Установлено, что синтезированные гибридные порошковые материалы AgI-MCM41 обладают хорошими эксплуатационными свойствами (сыпучесть, летучесть, влагопоглощение), что определяет их высокий потенциал применения в любых типах распылительных установок.

Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал применения синтезированных гибридных порошковых материалов AgI-MCM41 как реагента, применяемого в технологиях искусственных осадков.

Библиографический список

1. Фролов А.В. Современная российская гидрометеорологическая служба: новации и точки // Труды VII Всероссийского метеорологического съезда, 7-9 июля 2014 г., – Санкт-Петербург. Пленарный доклад. – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2015. – С. 9–31.
2. Тапасханов В.О., Тебуев А.Д. // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 23-25 октября 2001 г., Нальчик – Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 2005. – С. 67–85.
3. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозово-градовые облака и туманы. – Нальчик: Печатный двор, 2010. – 297 с.
4. Колосков Б.П. Современная концепция метеозащиты мегаполисов методами активных воздействий // Метеорология и гидрология – 2010 – № 8. – С. 21–32.
5. Wondie M. Modeling cloud seeding technology for rain enhancement over the arid and semiarid areas of Ethiopia // Heliyo, – 2023 – Vol. 9. – e1. 4974.
6. Prabhakaran T. [et al.] CAIPEEX: Indian Cloud Seeding Scientific Experiment // BAMS Article AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY – 2023. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0291.1>
7. Friedrich K. [et al.] Quantifying snowfall from orographic cloud seeding // PNAS – 2020 – Vol. 117 (10). – P. 5190–5195.
8. Yang J. Idealized numerical simulation experiment of ice seeding in convective clouds using a bin microphysics scheme // Atmospheric and Oceanic Science Letter – 2022. – Vol. 15. – e1. 00258.

9. Zielke S.A., Bertram A.K. A molecular mechanism of ice nucleation on model AgI Surface // J. Phys. Chem. B – 2015. – Vol. 29. – P. 9049–9055.
10. Баханов В.П. Генерация ледяных кристаллов хладореагентов для целей активных воздействий на переохлажденные облака и туманы // Обзор ВНИГМИ-МЦД, 1981. – 50 с.
11. Liu Z., Li C., Goonetilleke E.G. Role of surface templating on ice nucleation efficiency on silver iodide surface // J. Phys. Chem. C – 2021. – Vol. 125. – P. 18857–18865.
12. Huang H. Rock-salt and helix structures of silver iodides under ambient conditions // National Science Review – 2019. – Vol. 6. – P. 767–774.
13. Zipori A. Targeting and impacts of AgI cloud seeding based on rain chemical composition and cloud top phase characterization // Atmospheric Research – 2012. – Vol. 114–115. – P. 119–130.
14. Ким Н.С., Корнеев В.П., Частухин А.В., Шукин Г.Г. Экологические аспекты российских технологий активных воздействий на облака // Ученые записки РГГМУ – 2016. – № 46. – С. 91–99.
15. Аверкина А.С. Физико-химические основы технологии синтеза осадкопреобразующего реагента на основе AgI-SiO₂ / Дисс. канд. техн. наук: 2.6.7. – Пермь, ФГБУН ПНИПУ, 2022. – 197 с.
16. ОФС.1.4.2.0016.15 Общая фармакопейная статья «Степень сыпучести порошков».

NEW REAGENTS FOR ARTIFICIAL PRECIPITATION TECHNOLOGIES: HYBRID POWDERS AgI-SiO₂

Averkina A.S., Shamsutdinov A. Sh., Kondrashova N.B.,
Val'tsifer I.V., Val'tsifer V.A.,
Strel'nikov V.N.

Institute of Technical Chemistry of UB RAS

For citation:

Averkina A.S., Shamsutdinov A. Sh., Kondrashova N.B., Val'tsifer I.V., Val'tsifer V.A., Strel'nikov V.N. New reagents for artificial precipitation technologies: hybrid powders AgI-SiO₂ // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – № 3. – P. 6–14. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.3.1>

Hybrid powder materials (HPs) of the AgI-SiO₂ (AgI-MCM41), where SiO₂ is mesoporous mesophase silicon dioxide MCM41, were synthesized using the method of hydrothermal template co-condensation (HTS method). The HPs have a high potential of application in artificial precipitation technologies. The correlation between the concentration of silicon dioxide and silver iodide precursors and morphological, structural and textural, rheological characteristics of the synthesized AgI-MCM41 HPs was studied. Most attention is paid to the formation of a hexagonal crystal structure (β -form, Iodargyrite) of silver iodide and maintaining maximum development (high values of specific surface area) for the AgI-MCM41 system. The phase state of AgI and MCM41 in the hybrid composition was studied by scanning electron microscopy. The optimal component ratio necessary for the formation of the hexagonal structure of silver iodide was estimated. Such parameters as the value of specific surface area, pore volume and pore size were taken into account in the study of surface development. Sorption isotherms are described. Morphological features of the obtained AgI-MCM41 HPs were studied by scanning electron microscopy. A number of rheological parameters (such as volatility, fluidity) for synthesized powders was investigated, which allow predicting their performance properties. The condensation capabilities of the synthesized AgI-MCM41 HPs are described.

Keywords: hydrothermal synthesis, powder materials, hybrid, structural properties, textural properties, rheology, silicon dioxide, silver iodide, artificial precipitation technologies.

Сведения об авторах

Аверкина Анастасия Сергеевна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт технической химии УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИТХ УрО РАН»), 614013, г.Пермь, ул. Академика Королева, 3; e-mail: Anastasiya.Av11@yandex.ru

Шамсутдинов Артем Шамильевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, «ИТХ УрО РАН»; e-mail: literus12@gmail.com

Кондрашова Наталья Борисовна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, «ИТХ УрО РАН»; e-mail: kondrashova_n_b@mail.ru

Вальцифер Игорь Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, «ИТХ УрО РАН»; e-mail: igor12381@mail.ru

Вальцифер Виктор Александрович, доктор технических наук, заведующий лабораторией многофазных дисперсных систем, заместитель директора по научной работе, «ИТХ УрО РАН»; e-mail: valtsiferv@mail.ru

Стрельников Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор института, «ИТХ УрО РАН»; e-mail: svn@itcras.ru

Материал поступил в редакцию 26.06.2024 г.