

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 625.768.6
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-1-79-85>

Поступила в редакцию 21.10.2021
Received 21.10.2021

Д. В. Чередниченко¹, П. Д. Воробьев¹, В. В. Шевчук¹, Е. В. Воробьева¹,
Ю. В. Липай¹, А. С. Стромский²

¹Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
²ООО «ЕвроХим–Проект», Санкт-Петербург, Россия

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДИСПЕРСИЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Изучены особенности процессов структурообразования дисперсий сульфата и хлорида калия в присутствии связующих добавок различной природы. Показано, что наиболее эффективно процесс структурообразования протекает в присутствии комплексной добавки, содержащей тонкодисперсный глинистый компонент и высокомолекулярный полимер. Сделаны предположения о механизме структурообразования и оптимизирован процесс введения добавки в дисперсную систему.

Ключевые слова: сульфат калия, хлорид калия, дисперсная система, пластическая прочность, структурообразование

Для цитирования. Структурообразование минеральных дисперсий в динамических условиях / Д. В. Чередниченко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2022. – Т. 58, № 1. – С. 79–85. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-1-79-85>

D. V. Cherednichenko¹, P. D. Vorobiov¹, V. V. Shevchuk¹, E. V. Vorobieva¹, Yu. V. Lipai¹, A. S. Stromsky²

¹Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
²EuroChem–Project, Saint-Petersburg, Russia

STRUCTURE FORMATION OF MINERAL DISPERSIONS IN DYNAMIC CONDITIONS

Abstract. The features of the structure formation processes of potassium sulfate and chloride dispersions in the presence of various binding additives have been studied. It has been shown that the process of structure formation proceeds most effectively in the presence of a complex additive containing a finely dispersed clay component and a high molecular weight polymer. Mechanism of structure formation and the optimized process of additive introduction into the dispersed system is discussed.

Keywords: potassium sulfate, potassium chloride, dispersed system, plastic strength, structure formation

For citation. Cherednichenko D. V., Vorobiov P. D., Shevchuk V. V., Vorobieva E. V., Lipai Yu. V., Stromsky A. S. Structure formation of mineral dispersions in dynamic conditions // *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 79–85 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-1-79-85>

Введение. Результаты исследования структурообразования минеральных дисперсий и определение влияния условий процесса на физико-химические и механические характеристики дисперсий составляют основу для активно развивающегося научного направления управляемого структурообразования. Данный термин относится главным образом к прогнозированию влияния различных факторов на свойства дисперсной структуры в заданных условиях. Факты управляемого структурообразования минеральных удобрений часто встречаются в производственной практике, но, как правило, они не имеют объективного описания, убедительных объяснений, обобщений и рассматриваются в качестве эмпирических.

Согласно классическим представлениям коллоидной химии прочность гранулированных материалов как капиллярно-пористых структур зависит от количества и прочности единичных контактов между частицами [1, 2]. Условно можно выделить три типа структур, формирующихся на различных стадиях процесса в зависимости от способа взаимодействия частиц: структуры с точечными контактами между частицами в результате действия Ван-дер-Ваальсовых и электростатических сил; структуры с коагуляционными контактами между частицами за счет капиллярных сил, обусловленных присутствием жидкой фазы, и, наконец, конденсационные струк-

туры с фазовыми контактами, образующиеся после отверждения прослойки между частицами дисперсной фазы. Формирование твердофазных контактов может осуществляться за счет кристаллизации растворенного вещества увлажненной твердой фазы или, например, при отверждении полимерных связующих добавок на поверхности частиц [3, 4].

На практике процесс структурообразования (гранулирования) может осуществляться различными методами: прессование, окатывание (агломерация), экструзия и другие, и выбор того или иного метода применительно к конкретной дисперсной системе является достаточно сложной задачей. Для гранулирования солевых дисперсий, в частности хлорида и сульфата калия, наибольшее распространение получил метод прессования с различными вариантами предварительной подготовки шихты и (или) химической обработки. Известны способы, когда продукт, поступающий на гранулирование, обрабатывают водой или водяным паром, водными растворами сульфата аммония, сульфатом кальция и фосфорной кислотой, полифосфатом, кремнийорганическими веществами, полиакриламидом, лигносульфонатами и т. д. [5–8].

При структурообразовании в динамических условиях непрерывное движение дисперсного материала приводит, с одной стороны, к формированию и росту агрегатов (гранул), с другой – к разрушению наименее прочных из них. При одновременном протекании этих противодействующих процессов образуются близкие по форме, размеру и свойствам гранулы.

Структурообразование высококонцентрированных дисперсных систем в статических и динамических условиях имеет принципиальные отличия на стадиях взаимодействия частиц дисперсной фазы и стабилизации структуры. Использование закономерностей, выявленных для процессов одного направления, неприемлемо для другого.

Структурообразование в динамических условиях имеет ряд особенностей. В данном случае формирование агрегатов (зародышеобразование) и их укрупнение за счет наслоения частиц на центры зародышеобразования осуществляется самопроизвольно посредством действия капиллярных сил, тогда как прессование требует значительного внешнего давления для уплотнения частиц. На практике использование метода структурообразования в динамических условиях позволяет значительно снизить энергопотребление и получить агрегаты шарообразной формы.

Несмотря на значительное количество публикаций по гранулированию порошкообразных материалов, вопросы структурообразования солевых дисперсий в динамических условиях и влияние химических реагентов различных классов на свойства гранул остаются малоизученными. В данной статье представлены результаты исследования влияния органических (полимерных) добавок и каолина на реологические и физико-химические свойства солевых дисперсий хлорида и сульфата калия в процессе структурообразования в динамических условиях.

Экспериментальная часть. В работе использовали хлорид и сульфат калия марки «х. ч.». Для проведения опытов по грануляции из объема материала путем отсева была выделена фракция 0,25–0,35 мм.

В качестве минеральной связующей добавки использовали каолин (каталожный номер 18616, Мерс, Германия) с плотностью 2,8 г/см³ и удельной поверхностью по низкотемпературной адсорбции азота 15 м²/г. В качестве водорастворимого органического связующего использовали полиакриламид с молекулярной массой 1,2·10⁴ (П1); 5,0·10⁵ (П2); 1,4·10⁷ (П3) (Ashland).

Структурообразование солевой дисперсии проводили на лабораторном барабанном грануляторе при одинаковых условиях (скорость вращения барабана – 40 об./мин, время – 15 мин, температура – 22±2 °С, влажность материала – 12–16 мас.%). Влажные гранулы сушили в лабораторном сушильном шкафу при температуре 110 °С до влажности не более 0,1 %. Статическую прочность гранул (S , МПа) определяли измерением среднего усилия разрушения 20 гранул на приборе ИПГ-1.

Физико-химические и реологические свойства дисперсий определяли по известным методикам [9, 10]; величину пластической прочности (P , МПа) и предельное напряжение сдвига – с использованием конического пластометра по максимальному значению силы сопротивления, возникающей при погружении конуса в образец под действием нагрузки, отнесенной к единице площади соприкосновения с системой.

Электронно-микроскопическое изображение осадков получали с использованием электронного сканирующего микроскопа JSM-5610 6 LV с системой химического анализа EDXJED-2201 JEOL (Япония).

Результаты и их обсуждение. Процесс структурообразования дисперсий в динамических условиях условно состоит из нескольких основных стадий: взаимодействие дисперсии с жидкой фазой с образованием коагуляционных структур; формирование пластичных агрегатов; стабилизация структуры агрегатов за счет образования прочных фазовых контактов между частицами дисперсной фазы [11, 12]. При постоянном перемещении частиц, которое приводит одновременно к образованию и разрушению агрегатов, реализация контактного взаимодействия между частицами требует определенного уровня влажности.

На кривой зависимости пластической прочности дисперсий сульфата и хлорида калия от влажности (рис. 1) можно выделить несколько участков, соответствующих определенному состоянию увлажненной дисперсии. Из рис. 1 видно, что при влажности солевых дисперсий выше 2–3 % их пластическая прочность увеличивается в 3–4 раза и далее медленно возрастает в интервале влажности от 3 до 10–12 %. Можно предположить, что при увеличении влажности жидкостные «мостики» сливаются, заполняя пространство между частицами. Жидкостные мениски, образующиеся на выходе капилляров, оказывают всасывающее действие на жидкость, находящуюся внутри смачиваемого материала [13, 14]. Твердые частицы удерживаются за счет капиллярных сил на границе жидкость–воздух на поверхности образовавшихся агрегатов. При повышении влажности, когда дисперсная система переходит в так называемое «капиллярное» состояние, наблюдается резкое увеличение пластической прочности, зависимость пластической прочности от влажности носит экстремальный характер. Для дисперсий хлорида и сульфата калия «капиллярное состояние» достигается в интервале влажности 12–15 %.

Дальнейшее увлажнение дисперсии вызывает уменьшение пластической прочности, что связано с ослаблением взаимодействия между частицами вследствие увеличения толщины прослоек жидкости между ними. С ростом содержания жидкой фазы система переходит в состояние суспензии.

Пластическая прочность дисперсии хлорида калия несколько больше, чем суспензии сульфата калия, что, вероятно, обусловлено большей растворимостью KCl. Растворяясь в дисперсной среде, соль увеличивает ее вязкость и поверхностное натяжение, что при схожести прочих физико-механических свойств дисперсии вызывает увеличение силы капиллярного взаимодействия. Частичное растворение твердых частиц одновременно увеличивает объемную долю жидкости в системе и обуславливает более ранний переход суспензии хлорида калия в капиллярное состояние.

Гранулы, полученные в процессе структурообразования солевых дисперсий в динамических условиях, характеризуются относительно невысокой статической прочностью (0,15–0,2 МПа), причем прочность увеличивается в интервале значений влажности, которые соответствуют максимальным значениям пластической прочности. Прочность гранул, полученных из хлорида калия, за счет большей растворимости и, как следствие, большего количества вещества, участвующего в образовании солевых мостиков между отдельными частицами, оказывается выше – до 0,3 МПа.

В процессе структурообразования в динамических условиях соотношение между

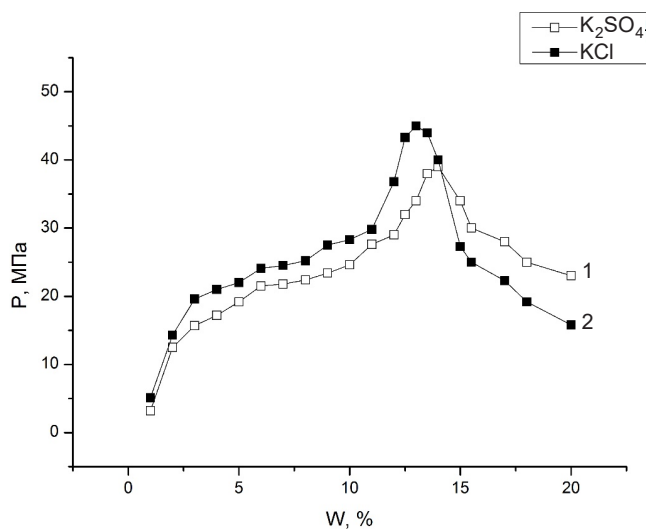


Рис. 1. Пластическая прочность дисперсий сульфата (1) и хлорида (2) калия в зависимости от влажности

Fig. 1. Plastic strength of potassium sulfate (1) and chloride (2) dispersions vs. humidity

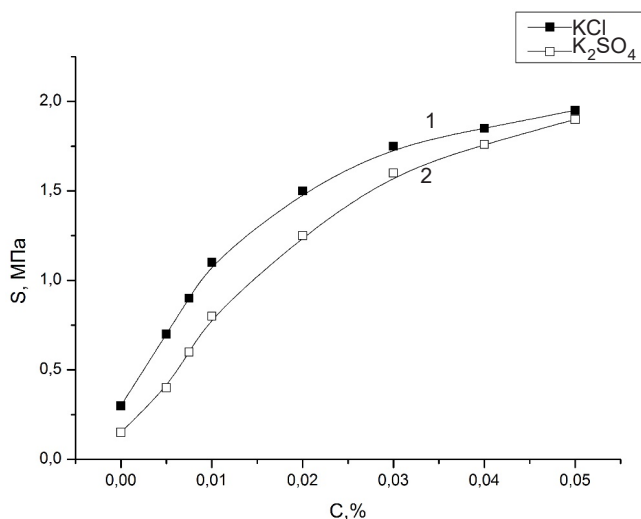


Рис. 2. Прочность гранул хлорида (1) и сульфата (2) калия в зависимости от содержания полимера ПЗ

Fig. 2. Strength of granules of potassium chloride (1) and sulfate (2) depending on the content of polymer P3

15–20 % при использовании ПЗ по сравнению с П1 в процессе структурообразования и с повышением прочности отдельных контактов вследствие образования полимерных мостиков между частицами. Максимальное увеличение прочности наблюдается при содержании полимера в дисперсии 0,03–0,04 % (0,3–0,4 г/кг). Прочность гранул, полученных из дисперсии хлорида калия, выше, чем из сульфата калия. По мере увеличения количества полимерного связующего эта разница уменьшается.

В общем случае характер капиллярного взаимодействия между частицами дисперсии определяется не только количеством воды в точках контакта, но числом и прочностью контактов в единице объема материала, что зависит от размера частиц. При относительно небольшом содержании мелких частиц «зазоры» между крупными зёрнами остаются практически свободными. Поэтому сравнительно большое среднеэффективное расстояние между частицами обуславливает пониженную прочность сцепления. При увеличении содержания мелких частиц структура материала становится более плотной, ее прочность возрастает.

Результаты исследования влияния глинистых минералов на физико-механические свойства гранул, полученных из солевых дисперсий, показали увеличение прочности гранул на 25–40 % – до 0,4–0,6 МПа, при введении 15–25 % (150–250 кг/т гранулята) каолина. Дальнейшее увеличение количества глинистого компонента требует существенного повышения влажности смеси, увеличивает пылимость гранулированных продуктов и снижает содержание в грануле основного компонента, при этом увеличение прочности не превышает 10–15 %.

Введение в солевую дисперсию комплексной органо-минеральной добавки, полученной флокуляцией каолина полимером ПЗ, приводит к изменению физико-химических и реологических свойств дисперсий хлорида и сульфата калия (таблица). При влажности, соответствующей «капиллярному» состоянию солевых дисперсий, увеличивается сопротивление вращательному срезу, сцепление между частицами, угол внутреннего трения и модуль деформации, что свидетельствует об упрочнении структуры. Полимер, введенный на стадии флокуляции глины, адсорбируется на поверхности глинистых частиц и соединяет их в агрегаты (флокулы). Введение флокул и влаги в солевую дисперсию и динамические условия процесса структурообразования способствуют формированию коагуляционных и конденсационно-кристаллизационных контактов между частицами дисперсии.

Для структур, формирующихся при введении в солевую дисперсию глинистых минералов (5–10 % или 50–100 г/кг), в частности каолина, и полиакриламида (0,03 % или 0,3 г/кг), как показали наши исследования, при увеличении продолжительности и интенсивности перемеши-

образованием, ростом и разрушением агрегатов зависит от прочности коагуляционных контактов между частицами дисперсной фазы, что в свою очередь определяется физико-химическими свойствами межфазной жидкости. Для повышения эффективности структурообразования дисперсии хлорида калия в работе использовали полиакриламид с различной молекулярной массой. Как показали результаты исследования, увеличение молекулярной массы полимера приводит к повышению прочности гранул, полученных из дисперсий хлорида и сульфата калия, и уменьшению содержания тонкодисперсных фракций продукта на 10–15 %.

С увеличением содержания полимера в дисперсии прочность гранул возрастает как для ПЗ (рис. 2), так и для других полимеров. Увеличение прочности гранул на

Таблица 1. Физико-химические и реологические свойства дисперсий хлорида и сульфата калия, содержащих сфлуктурированный полимером каолин (содержание каолина 10 %, полимера 0,1 г/кг каолина) в зависимости от влажности

Table 1. Physicochemical and rheological properties of potassium chloride and sulfate dispersions containing kaolin flocculated by polymer (kaolin content 10 %, polymer 0.1 g/kg kaolin) depending on humidity

Влажность W , %	Плотность ρ , г/см ³	Коэффициент пористости, e	Сопротивление вращательному срезу τ , кПа	Сцепление C , кПа	Угол внутреннего трения φ , град	Модуль деформации E , МПа
<i>Хлорид калия</i>						
7,0	1,6	1,0	2,8	5,5	22,1	4,3
12,0	1,65	1,1	3,4	8,3	24,8	5,6
16,0	1,7	1,2	3,0	6,3	19,6	3,2
<i>Сульфат калия</i>						
8,0	1,4	0,9	2,4	3,2	19,2	5,2
14,0	1,6	1,2	3,0	6,1	23,7	6,4
17,0	1,5	1,3	2,5	5,0	21,4	4,9

вания характерно необратимое уменьшение прочности. Прочность таких структур в первую очередь определяется образованием «мостиков» из макромолекул между агрегатами частиц каолина и соли. В динамических условиях возможен разрыв «мостиковых» контактов. Освободившиеся при этом макромолекулы в солевой дисперсии глобулизируются и практически не участвуют во вторичном образовании «мостиков». Следствием этого является то, что прочность солевой дисперсии глины в состоянии покоя не возвращается к первоначальному значению. Структуры солевых дисперсий с добавками глинистых минералов и полимеров (рис. 3, *a*) по своим свойствам занимают промежуточное положение между коагуляционными и конденсационно-кристаллизационными структурами и относятся к так называемой переходной структуре [14]. Особенностью переходных контактов является их неустойчивость по отношению к воде, т. е. способность гидратироваться и переходить в коагуляционные контакты. При этом глинистые частицы не способны свободно перемещаться друг относительно друга при деформации, что препятствует формированию пластичных агрегатов и снижает эффективность основной стадии структурообразования.

Глинистые частицы, сфлуктурированные полиакриламидом, а затем введенные в солевую дисперсию при структурообразовании в динамических условиях формируют структуру, отличную от смешанной дисперсии соли, каолина и полимера (рис. 3, *b*). Частицы сфлуктурированной глины в данном случае могут выступать в роли связки между кристаллическими сростками хлорида калия. В свою очередь соль, которая кристаллизуется в местах контактов глины, скрепляет частицы.

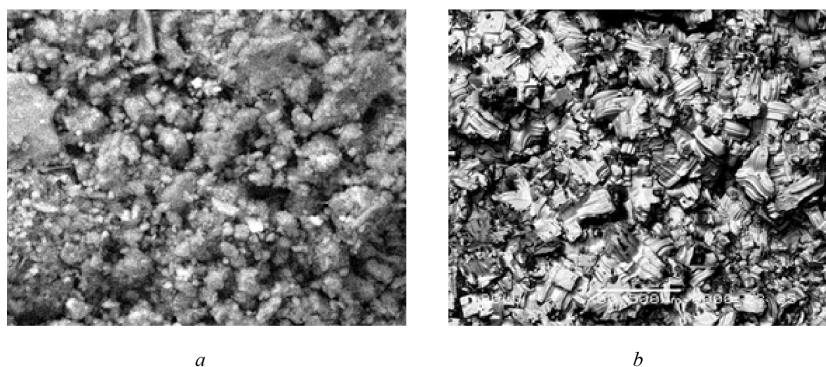


Рис. 3. Фотографии ($\times 50$ раз) солевой дисперсии хлорида калия с каолином (10 %) и полимером ПЗ (0,03 %), введенным в систему в виде раствора (*a*) и в составе сфлуктурированной глины (*b*)

Fig. 3. Photos (magnification 50 times) of a salt dispersion of potassium chloride with kaolin (10 %) and polymer P3 (0.03 %) introduced into the system as a solution (*a*) and as part of flocculated clay suspension (*b*)

В сфлуктурированной дисперсии глины полимер, адсорбированный на поверхности частиц, способствует формированию подвижных «мостичных» контактов в пластичной структуре агрегатов, которые обеспечивают способность глинистых частиц к перемещению относительно друг друга.

Структурообразование дисперсий хлорида и сульфата калия в присутствии комплексной органо-минеральной добавки, полученной флокуляцией каолина полимером ПЗ, позволяет улучшить важные в практическом плане показатели. Гранулометрический состав – количество гранул оптимального размера (2–4 мм) достигает 60–65 % по сравнению с 40 % при структурообразовании дисперсий без добавок. Прочность образующихся гранул увеличивается в 1,2–1,5 раза по сравнению с дисперсиями с каолином и полимером в качестве отдельных компонентов.

Результаты выполненных исследований использованы для разработки технологии получения новых форм калийных удобрений путем структурообразования в динамических условиях смешанных солевых и сфлуктурированных полимером глинистых дисперсий. Технология открывает возможности широкого варьирования состава удобрений и использования глинодержащих побочных продуктов калийного производства.

Выводы. Обнаружена экстремальная зависимость пластической вязкости дисперсий хлорида и сульфата калия от влажности, на основании которой предложены условия структурообразования в динамических условиях с получением наиболее прочных гранул. Статическая прочность гранул, полученных из солевых дисперсий, возрастает при введении в дисперсию водного раствора полиакриламида при увеличении его молекулярной массы и концентрации.

Использование добавок каолина в качестве структурообразователя позволяет несколько увеличить эффективность гранулирования, но при этом наблюдается ряд негативных явлений: увеличение оптимальной влажности гранулирования, повышенная пылимость гранул, снижение содержания основного компонента в грануле.

Структурообразование дисперсий хлорида и сульфата калия в присутствии комплексной органо-минеральной добавки, полученной флокуляцией каолина полимером ПЗ (содержание каолина 10 %, флокулянта 0,1 мг/г каолина), позволяет увеличить прочность и гранулометрический состав гранулированного продукта.

Список использованных источников

1. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика / П. А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 382 с.
2. Лиштван, И. И. Основные направления развития коллоидной химии / И. И. Лиштван, Н. П. Крутько, Ф. Ф. Можейко // Коллоид. журн. – 1995. – Т. 57, № 4. – С. 516–520.
3. The effect of the amount of binder liquid on the granulation mechanism and structure of granules prepared by high shear granulation / A. M. Bouwman [et al.] // Int. J. of Pharm. – 2005. – Vol. 290, N 1–2. – P. 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2004.11.024>
4. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review / S. M. Iveson [et al.] // Powder Technol. – 2001. – Vol. 117, N 1–2. – P. 3–39. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00313-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00313-8)
5. Robert, G. Study of alternative binders in agitation pelletizing / G. Robert, A. Hinkle. – Mars Minerals, 2001. – 13 p.
6. Agricultural foam marker compositions and use thereof: pat. US 6369122B1 / R. Subramanyam. – Publ. date 09.04.2002.
7. Ильина, Т. Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов / Т. Н. Ильина. – Белгород: БГТУ, 2009. – 229 с.
8. Чередниченко, Д. В. Влияние связующих реагентов различной природы на прочность гранул хлористого калия / Д. В. Чередниченко, Н. П. Крутько, Е. В. Воробьева // Журн. прикл. химии. – 2007. – № 8. – С. 25–29.
9. Круглицкий, Н. Н. Основы физико-химической механики / Н. Н. Круглицкий. – Киев: Вища школа, 1975. – 268 с.
10. Грунтоведение: учеб. пособие / В. Т. Трофимов [и др.]; под ред. В. Т. Трофимова. – 6-е изд. – М.: МГУ, 2005. – 1024 с.
11. Урьев, Н. Б. Закономерности структурообразования высококонцентрированных дисперсных систем в динамических условиях / Н. Б. Урьев // Коллоид. журн. – 1978. – Т. 60, № 5. – С. 915–922.
12. Zou, R. Evaluation of packing Characteristics of mono-sized non-spherical particles / R. Zou, A. Yu // Powder Technol. – 1996. – N 88, N 1. – P. 71–79. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(96\)03106-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(96)03106-3)
13. Соколов, В. Н. Образование коагуляционных структур. Механизм формирования и факторы, влияющие на образование природных коагуляционных структур // Физико-химическая механика природных дисперсных систем / В. Н. Соколов, В. И. Осипов; под ред. Е. Д. Щукина. – М., 1985. – Гл. 3. – С. 29–44.
14. Сид, Дж. В. Супрамолекулярная химия: в 2 т. / Дж. В. Сид, Дж. Л. Этвуд. – М.: Академкнига, 2007. – 2 т.

References

1. Rebinder P. A. *Physical and chemical mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 382 p. (in Russian).
2. Lishtvan I. I., Krut'ko N. P., Mozheiko F. F. Main directions of development of colloid chemistry. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid journal*, 1995, vol. 57, no. 4, pp. 516–520 (in Russian).
3. Bouwman A. M., Henstra M. J., Westerman D., Chung J. T., Zhang Z., Ingram A., Seville J. P., Frijlink H. W. The effect of the amount of binder liquid on the granulation mechanism and structure of granules prepared by high shear granulation. *International journal of pharmaceuticals*, 2005, vol. 290, no. 1–2, pp. 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2004.11.024>
4. Iveson S. M., Litster D. J., Hapgood K., Ennis B. J. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. *Powder technology*, 2001, vol. 117, no. 1–2, pp. 3–39. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00313-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00313-8)
5. Robert G., Hinkle A. *Study of alternative binders in agitation pelletizing*. Mars Minerals, 2001. 13 p.
6. Subramanyam R. *Agricultural foam marker compositions and use thereof*. Patent US, no. 6369122B1, 2002.
7. Plyina T. N. *Agglomeration processes in technologies for processing dispersed materials*. Belgorod, BSTU, 2009. 229 p. (in Russian).
8. Cherednichenko D. V., Krut'ko N. P., Vorobieva E. V. Influence of binding agents of various nature on the strength of potassium chloride granules. *Zhurnal Prikladnoi Khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 2007, no. 8, pp. 25–29 (in Russian).
9. Kruglitskiy N. N. *Fundamentals of physical and chemical mechanics*. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1975. 268 p. (in Russian).
10. Trofimov V. T., Korolev V. A., Voznesensky E. A., Golodkovskaya G. A., Vasilchuk Yu. K., Ziangirov R. S. Ed. V. T. Trofimova. *Soil science*. Moscow, Moscow State University, 2005. 1024 p. (in Russian).
11. Uriev N. B. Patterns of structure formation of highly concentrated dispersed systems in dynamic conditions. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid journal*, 1978, vol. 60, no. 5, pp. 915–922 (in Russian).
12. Zou R., Yu A. Evaluation of packing Characteristics of mono-sized non-spherical particles. *Powder technology*, 1996, no. 88, no. 1, pp. 71–79. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(96\)03106-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(96)03106-3)
13. Sokolov V. N., Osipov V. I. Formation of coagulation structures. The formation mechanism and factors affecting the formation of natural coagulation structures. *Physical and chemical mechanics of natural dispersed systems*. Moscow, 1985, Ch. 3, pp. 29–44 (in Russian).
14. Steed J. V., Atwood J. L. *Supramolecular Chemistry*. Wiley, 2009. 970 p. <https://doi.org/10.1002/9780470740880>

Информация об авторах

Чередниченко Денис Викторович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by

Воробьев Павел Дмитриевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pdvc@tut.by

Шевчук Вячеслав Владимирович – член-корреспондент НАН Беларуси, д-р хим. наук, зав. отделом. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ShevchukSlava@rambler.ru

Воробьева Елена Викторовна – д-р хим. наук, профессор, зав. лаб. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Липай Юлия Владимировна – канд. хим. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yuliya.M@tut.by

Стромский Анатолий Сергеевич – нач. отдела переработки твердых полезных ископаемых. ООО «ЕвроХим–Проект» (В.О., 26 линия, д. 15, корп. 2, 199106, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: anatoly.stromsky@eurochemproject.ru

Information about the authors

Cherednichenko Denis V. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by

Vorobiov Pavel D. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pdvc@tut.by

Shevchuk Viacheslau V. – Correspondent Member of NAS of Belarus, D. Sc. (Chemistry), Head of the Department. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ShevchukSlava@rambler.ru

Vorobieva Elena V. – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Lipai Yuliya V. – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yuliya.M@tut.by

Stromsky Anatoly S. – Head of Department of Processing of Solid Minerals. EuroChem-Project (V.I., 26 line, 15, building 2, 199106, Saint-Petersburg, Russia). E-mail: anatoly.stromsky@eurochemproject.ru