

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛЕЖИВАНИЯ АЗОТНО-ФОСФАТНЫХ УДОБРЕНИЙ**В.В. Соколов, И.М. Кочетова, Г.А. Шестаков, И.С. Медников, Н.В. Колпакова, Е.А. Андриянова**

Валерий Васильевич Соколов (ORCID 0009-0001-0383-3943), Инна Маратовна Кочетова (ORCID 0009-0006-0345-3816), Глеб Алексеевич Шестаков (ORCID 0009-0005-0079-0297)*, Игорь Сергеевич Медников (ORCID 0009-0008-0730-3318), Наталья Владимировна Колпакова

Отдел качества и стандартизации, АО «Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсекто-фунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова», Северное шоссе, 75, Череповец, Российская Федерация, 162625
E-mail: bbc1953@mail.ru, inna_kocetova@mail.ru, olden47@gmail.com*, mednickoff.jn@yandex.ru, Natalya.nikolaeva1990@mail.ru

Екатерина Александровна Андриянова

ООО «Метром Рус», Корабельная улица, 9а, Москва, Российская Федерация, 115142

E-mail: kap_chto@mail.ru

Слеживаемость является одной из основных причин потери качества гранулированных минеральных удобрений при транспортировке и хранении. В основе механизма слеживания удобрений лежат многочисленные циклы его увлажнения-подсыхания, приводящие сначала к образованию насыщенного раствора между частицами, а затем, при высыхании образца - к формированию твердых солевых мостиков в точках контакта. В работе представлен актуализированный вариант метода количественного определения слеживаемости, разработанный на основе ГОСТ 21560.4-76. С целью моделирования различных условий транспортировки удобрений (в герметичных мешках, так называемых «биг-бегах», и при бестарной транспортировке навалом) подобраны два варианта параметров проведения испытаний: в сушильном шкафу Binder ED 53 и в климатической камере Binder KMF 115. В качестве объекта при проведении испытаний выбран аммофос – гранулированное азотно-фосфорное удобрение. Исследована зависимость абсолютной влажности в межгранульном пространстве образца от времени для каждого из вариантов испытаний. Изучена зависимость слеживаемости образца аммофоса от продолжительности проведения испытания, показано, что при испытании в климатической камере слеживаемость достигает максимальных значений приблизительно за 4 ч. Для варианта с выдерживанием в климатической камере исследована зависимость слеживаемости образца от нагрузки при формировании брикета, показано, что зависимость имеет близкий к линейному характер. Установлено, что получаемые значения слеживаемости образца аммофоса линейно возрастают при увеличении относительной влажности в климатической камере. При этом для образца, обработанного кондиционирующей добавкой, значения слеживаемости значительно ниже, чем для варианта без обработки.

Ключевые слова: слеживаемость, сложные минеральные удобрения, аммофос, относительная влажность, температура

Для цитирования:

Соколов В.В., Кочетова И.М., Шестаков Г.А., Медников И.С., Колпакова Н.В., Андриянова Е.А. Исследование процесса слеживания азотно-фосфатных удобрений. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 5. С. 49–55. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.9f.

For citation:

Sokolov V.V., Kochetova I.M., Shestakov G.A., Mednikov I.S., Kolpakova N.V., Andrianova E.A. Study of the caking process of the nitrogen-phosphate fertilizers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 5. P. 49–55. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.9f.

STUDY OF THE CAKING PROCESS OF THE NITROGEN-PHOSPHATE FERTILIZERS

V.V. Sokolov, I.M. Kochetova, G.A. Shestakov, I.S. Mednikov, N.V. Kolpakova, E.A. Andrianova

Valeriy V. Sokolov (ORCID 0009-0001-0383-3943), Inna M. Kochetova (ORCID 0009-0006-0345-3816), Gleb A. Shestakov (ORCID 0009-0005-0079-0297)*, Igor S. Mednikov (ORCID 0009-0008-0730-3318), Natalya V. Kolpakova

Quality and Standardization Department, Samoilov Scientific Research Institute for Fertilizers and Insectofungicides, Severnoe highway, 75, Cherepovets, 162622, Russia

E-mail: bbc1953@mail.ru, inna_kocetova@mail.ru, olden47@gmail.com*, mednickoff.jn@yandex.ru, Natalya.nikolaeva1990@mail.ru

Ekaterina A. Andrianova

ООО «Metrohm Rus» (Metrohm Rus, LLC), Korabelnaya st., 9a, Moscow, 115142, Russia

E-mail: kap_chto@mail.ru

Caking is one of the main reasons for the loss of quality of granular mineral fertilizers during storage and transportation. The mechanism of fertilizer caking is based on some cycles of its humidification-drying, leading first to the formation of a saturated solution between the particles, and then, when the sample dries, to the formation of solid salt bridges at the contact point. The paper presents an updated version of the method for determining caking based on GOST 21560.4-76. In order to simulate various conditions of fertilizer transportation (in sealed bags, so called big-bags, and for bulk transportation), two variants of test parameters were selected: in a drying cabinet and in a climate chamber. Ammophos, a granular nitrogen-phosphorous fertilizer, was selected as the object of the tests. The dependence of the absolute humidity in the intergranular space of the sample for each variant of the test is investigated. The dependence of caking on the test time was studied, it was shown that when tested in a climatic chamber, caking reaches its maximum values in about 4 hours. For the variant with holding in a climatic chamber, the dependence of caking on the load was studied. It was shown that the dependence has close to linear character. It was found that caking increases linearly with an increase in relative humidity in tested in the climatic chamber.

Keywords: caking, complex mineral fertilizers, ammophos, relative humidity, temperature

ВВЕДЕНИЕ

Слеживаемостью называют свойство удобрений, как порошковых, так и гранулированных, образовывать агломераты или монолитную массу. Как правило, она является результатом циклов увлажнения-подсыхания, приводящих вначале к образованию насыщенного раствора между частицами, а затем, при высыхании образца – к формированию твердых солевых мостиков в точках контакта [1-4]. Данный механизм реализуется при многократных переходах относительной влажности воздуха через точку гигроскопичности удобрения при остывании продукции на складах, при суточных колебаниях температуры и влажности, при воздействии внешних условий в процессе транспортировки наземным или морским транспортом. Слеживаемость является одной из основных причин потери качества гранулированных минеральных удобрений при транспортировке и хранении [4-12].

Для снижения слеживаемости гранулированных удобрений применяют различные под-

ходы. Наиболее распространенным является применение поверхностных кондиционирующих добавок, которые, в дополнение к снижению слеживаемости, снижают также и пылимость удобрений, являющуюся другим значимым для потребителя параметром качества [7, 9, 10, 13, 16]. Кроме того, склонность продукта к слеживанию определяется во многом параметрами технологического процесса при его производстве [6, 18, 19]. Достаточно широко применяются и антислеживающие и гидрофобизирующие добавки, вводимые в состав удобрения [12, 15, 17, 20, 21].

Количественное определение слеживаемости минеральных удобрений представляется актуальным вопросом. В настоящий момент отсутствует стандартизированный подход к ее измерению, многие предприятия используют методики собственной разработки [8, 9, 14]. В работе проведен обзор наиболее широко применяемых практик определения слеживаемости гранулированных минеральных удобрений (таблица). Представлен новый, актуализированный вариант метода определе-

ния слеживаемости, разработанный на основе ГОСТ 21560.4-76.

Таблица

Методы определения слеживаемости: основные характеристики

Table. Caking testing techniques: basic characteristics

№ п/п	Разработчик метода	Условия эксперимента
1	Arcema group (CECA) Франция	0,5-1,0 МПа, 35 °С, 16 ч
2	Holland NovoChem Голландия	В автоклаве 0,2 МПа, 30 °С, 1 неделя
3	КАО Corporation Япония	0,25 МПа, согласно ТУ на удобрение
4	Метод E068ESI Гомельский хим. завод ООО «КГП»	0,13 – 0,18 МПа, 20-25 °С, 24 ч
5	Компания FILTRA (Индия)	0,57 МПа, 30-35 °С, отн. влажность 65-75%, 12 ч
6	Akzo Nobel Швеция	0,15 МПа, 35 °С *4 ч. 38 °С*2 ч. влажность равна критической относительной влажности (CRH), 25 °С*4 ч. 28 °С*2 ч. влажность равна 5 CRH, 68 ч
7	ГИАП ОАО «Невиномысский хим. завод»	0,01 МПа, 90-100 °С, 3 ч
8	ОАО «НИУИФ» аннулированный ГОСТ 21560.5-82	0,03 МПа, 50±2 °С, 3 ч
9	ГНУ ВНИМС взамен ОСТ 46163-84	0,5 МПа, от 20 до 50 °С, от 2 до 15 ч

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Представленный в работе метод определения слеживаемости гранулированных минеральных удобрений разработан на основе ГОСТ 21560.4-76 [22]. В связи с улучшением качества производимых удобрений предлагаемый в ГОСТ алгоритм измерений не обеспечивает слеживания образцов, в связи с чем в работе проведена его модернизация, в первую очередь – за счет увеличения нагрузки на образец (ГОСТ подразумевает нагрузку, равную 3 кг).

С целью моделирования двух вариантов условий транспортировки удобрений – упакованными в герметичную тару (так называемые «биг-беги») и при бестарной транспортировке навалом – проводили испытания соответственно в сушильном шкафу Binder ED 53 и в климатической камере Binder KMF 115. Определение слеживаемости включало в

себя три последовательные операции: отбор и подготовка аналитической пробы, формирование брикетов и выдерживание образцов брикетов в пресс-форме при определенных условиях испытания (продолжительность, температура, относительная влажность при выдерживании в климатической камере) и определение прочности образовавшегося брикета. Образцы для испытаний помещали в пресс-формы и уплотняли на вибростенде, после усадки досыпали пресс-форму образцом доверху. Пресс-формы помещали в лабораторный пресс и нагружали до заданного значения нагрузки с помощью анализатора текстуры TAXT Plus (Stable MicroSystems). При проведении испытаний в сушильном шкафу (имитация перевозки удобрений в «биг-бегах») пресс-формы с целью герметизации предварительно оборачивали в два-три слоя пищевой пленки. Формы с образцами выдерживали в течение установленного времени в климатической камере при заданной температуре и относительной влажности либо в сушильном шкафу при заданной температуре. Затем формы с образцами выдерживали при комнатных условиях (температура окружающего воздуха (20±5) °С и относительной влажности воздуха не более 60%) в течение 2 ч. Извлекали сформировавшийся брикет и определяли его прочность путем разрушения на анализаторе текстуры TAXT Plus, измеряя усилие (Н), необходимое для разрушения.

Используемые лабораторные прессы состоят из пресс-форм с перфорированными стенками, в которую загружается навеска приблизительно 35-45 г, а также устройства с тарированной пружиной, которая позволяет нагружать образец до 50 кг (500 Н). Все исследования проводили с образцом аммофоса – наиболее широко применяемого гранулированного азотно-фосфорного удобрения. Средняя статическая прочность гранул исследуемого образца составляла 6,5 МПа, массовая доля гранул размером от 2 до 5 мм – 90%.

1. Исследование зависимости абсолютной влажности в межгранульном пространстве образца аммофоса от времени при различных параметрах испытания.

Для исследования температуры и влажности воздуха в межгранульном пространстве в одном из прессов в нижней части кассеты просверлено отверстие диаметром 5 мм, куда помещали датчик гигрометра Rotronic HC2-P05.

В ходе исследования рассматривали два набора параметров испытания образцов:

а. Температура 52 °С, относительная влажность воздуха 30%, пресс-форма с образцом обер-

нута в герметичную пленку. Испытание проводится в сушильном шкафу.

б. Температура 38 °С, относительная влажность воздуха 70%. Испытание проводится в климатической камере.

Время термостатирования для каждого из вариантов составляло 360 мин, время охлаждения в комнатных условиях 120 мин. Далее прочность получаемых брикетов определяли описанным выше способом.

2. Исследование зависимости слеживаемости образца аммофоса от времени проведения испытания.

Лабораторный пресс с образцом аммофоса выдерживали в течение определенных промежутков времени (0,5, 1, 2, 4, 5, 6) ч при следующих условиях:

а. В климатической камере, температура 38 °С, относительная влажность 70%,

б. В сушильном шкафу, температура 52 °С, пресс-форма обернута герметичной пленкой.

Нагрузка на образец в обоих вариантах составляла 28 кг, время охлаждения 2 ч.

3. Исследование зависимости слеживаемости образца аммофоса от нагрузки на образец.

Лабораторный пресс с образцом аммофоса помещали в климатическую камеру при температуре 38 °С и относительной влажности 70%, время охлаждения составляло 2 ч. В ходе испытания с помощью анализатора текстуры TactPlus устанавливали нагрузку в 100, 200, 280, 400, 500 Н.

4. Исследование зависимости слеживаемости образца аммофоса от влажности воздуха в климатической камере.

Лабораторный пресс с образцом аммофоса помещали в климатическую камеру при температуре 38 °С и влажности окружающего воздуха 50, 60, 70, 80, 90%. Нагрузка на образец составляла 28 кг, время охлаждения 2 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено (рис. 1), что при испытании в сушильном шкафу герметизация пресс-форм с помощью пленки препятствует удалению содержащейся в образце гигроскопической влаги, в результате чего влага перераспределяется между гранулами и воздухом межгранульного пространства. Данные условия моделируют транспортировку удобрений в герметичных мешках – «биг-бегах».

При проведении опыта в климатической камере при относительной влажности выше значения гигроскопической точки для данного продукта происходит сначала сорбция воды массой образца,

образование насыщенного раствора между частицами, затем, при выдерживании при комнатных условиях, формируются твердые солевые мостики в точках контакта. Данные условия моделируют слеживание удобрений в процессе транспортировки навалом, то есть при свободном контакте продукта с воздухом, в особенности в климатических условиях Юго-Восточной Азии.

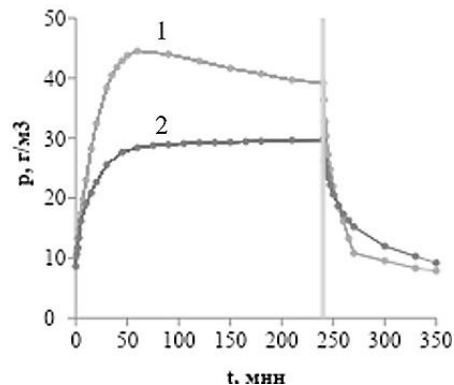


Рис. 1. Зависимость абсолютной влажности в межгранульном пространстве образца от времени при различных параметрах испытания: p – Абсолютная влажность, t – время, 1 – сушильный шкаф, 2 – климатическая камера

Fig. 1. Changes in absolute humidity in the intergranular space over time: p – Absolute humidity, t – time, 1 – drying chamber, 2 – climatic chamber

На основе представленных на рис. 2 данных можно заключить, что максимальные значения слеживаемости при испытаниях в климатической камере достигаются приблизительно через 4 ч после начала испытания. При выдерживании в сушильном шкафу с герметизацией пресс-формы пленкой слеживаемость образцов имеет более низкие абсолютные значения. С увеличением времени испытания наблюдается некоторое увеличение получаемых значений слеживаемости.

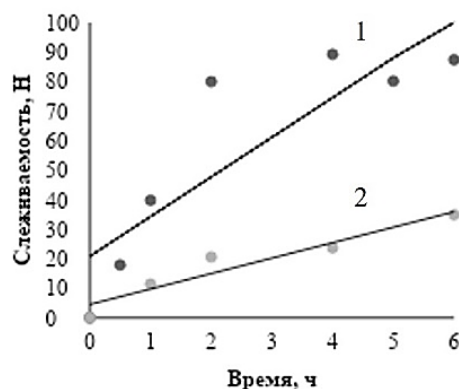


Рис. 2. Зависимость значения слеживаемости аммофоса от времени: 1 – климатическая камера, 2 – сушильный шкаф
Fig. 2. Dependence of ammophos caking on the test time: 1 – climatic chamber, 2 – drying chamber

На основе представленных на рис. 3 данных можно заключить, что зависимость получаемых значений слеживаемости образца от прилагаемой нагрузки имеет близкий к линейному характер ($R^2 = 0,961$).

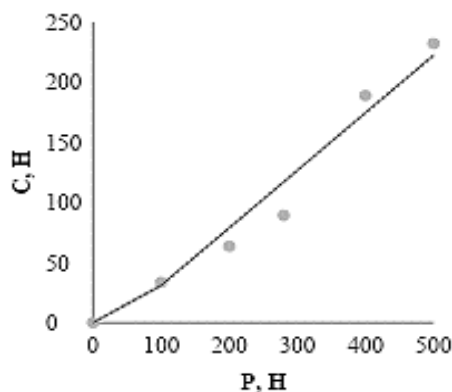


Рис. 3. Зависимость значения слеживаемости аммофоса от нагрузки: С – слеживаемость, Р – нагрузка
Fig. 3. Dependence of ammonophos caking on pressing strength: C – caking, P – load

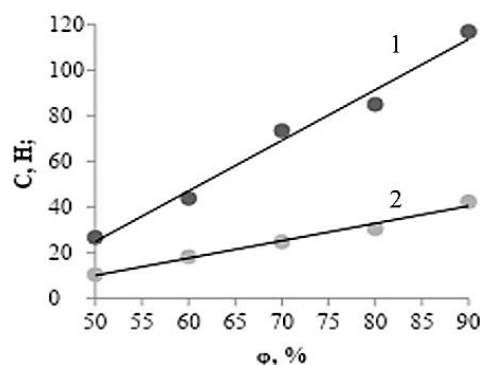


Рис. 4. Зависимость значения слеживаемости аммофоса от относительной влажности воздуха: С – слеживаемость, φ – относительная влажность воздуха в климатической камере, 1 – аммофос, 2 – аммофос, обработанный кондиционирующей добавкой
Fig. 4. Dependence of ammonophos caking on the relative humidity: C – caking, φ – relative humidity of the air in the climate chamber, 1 – Ammophos, 2 – Ammophos with conditioning additive

Установлено (рис. 4), что получаемые значения слеживаемости образца аммофоса линейно

возрастают при увеличении относительной влажности в климатической камере. При этом для образца, обработанного поверхностной кондиционирующей добавкой СК-9 на основе минерального масла И-40 и алифатических аминов, получаемые значения слеживаемости значительно ниже, чем для варианта без обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен актуализированный вариант метода количественного определения слеживаемости, разработанный на основе ГОСТ 21560.4-76. С целью моделирования различных условий транспортировки удобрений (в герметичной таре, так называемых «биг-бегах», и при бесстарной транспортировке навалом) подобраны два варианта параметров проведения испытаний: в сушильном шкафу Binder ED 53 и в климатической камере Binder KMF 115. Исследована зависимость абсолютной влажности в межгранульном пространстве образца от времени для каждого из вариантов испытаний. Изучена зависимость слеживаемости образца аммофоса от времени проведения испытания, показано, что при испытании в климатической камере слеживаемость достигает максимальных значений приблизительно за 4 ч.

Для варианта с выдерживанием в климатической камере исследована зависимость слеживаемости образца от нагрузки при формировании брикета, показано, что зависимость имеет близкий к линейному характер.

Установлено, что получаемые значения слеживаемости образца аммофоса линейно возрастают при увеличении относительной влажности в климатической камере. При этом для образца, обработанного поверхностной кондиционирующей добавкой, получаемые значения слеживаемости значительно ниже, чем для варианта без обработки.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тыс А., Penkala S., Biegan M., Nieweś D., Huculak-Mączka M., Hoffmann K. The effectiveness of commercial anticaking agents for ammonium nitrate fertilizers. *Ecol. Chem. Eng.* 2019. V. 26. N 1-2. DOI: 10.2428/ecea.2019.26(1-2)11.
2. Lök B., Gedikağaoğlu M., Şen F. Studies for alternative anti-caking additives used in the production of ammonium nitrate. *J. Sci. Rep.* 2023. N 057. P. 1-11. DOI: 10.59313/jsr-a.1238934.
3. Chen M., Wu S., Xu S., Yu B., Shilbayeh M., Liu Y., Zhu X., Wang J., Gong J. Caking of crystals: Characterization,

REFERENCES

1. Tys A., Penkala S., Biegan M., Nieweś D., Huculak-Mączka M., Hoffmann K. The effectiveness of commercial anticaking agents for ammonium nitrate fertilizers. *Ecol. Chem. Eng.* 2019. V. 26. N 1-2. DOI: 10.2428/ecea.2019.26(1-2)11.
2. Lök B., Gedikağaoğlu M., Şen F. Studies for alternative anti-caking additives used in the production of ammonium nitrate. *J. Sci. Rep.* 2023. N 057. P. 1-11. DOI: 10.59313/jsr-a.1238934.
3. Chen M., Wu S., Xu S., Yu B., Shilbayeh M., Liu Y., Zhu X., Wang J., Gong J. Caking of crystals: Characterization,

- mechanisms and prevention. *Powder Technol.* 2018. V. 337. P. 51-67. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.04.052.
4. **Kayahoglu A.** Alternative solutions for the physicochemical evaluation and improvement of the caking properties of calcium ammonium nitrate fertilizer as a quality problem under atmospheric conditions. *J. Chin. Inst. Eng.* 2023. V. 46. N 7. P. 795-804. DOI: 10.1080/02533839.2023.2238778.
5. **Senhaji M. L., Hafnaoui A., Khouloud M., El Agri A., El Arsi M., Boulahna A.** Screening and mixture design applied to formulate anti-caking compositions for reducing the caking tendency of granular phosphate fertilizers. *Mediterr. J. of Chem.* 2021. V. 11. N 2. P. 115-125. DOI: 10.13171/mjc02102221569mls.
6. **Гаврилюк А.Н., Дормешкин О.Б.** Исследование физико-химических превращений, протекающих в объеме гранул комплексных минеральных удобрений в процессе хранения. *Тр. БГТУ. Сер. 2: Хим. технологии, биотехнология, геоэкология.* 2021. № 1 (241). С. 126-138.
7. **Albadarin A.B., Lewis T.D., Walker G.M.** Granulated polyhalite fertilizer caking propensity. *Powder Technol.* 2017. V. 308. P. 193-199. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.12.004.
8. **Николаева Н.В., Почиталкина И.А., Соколов В.В.** Определение оптимальных условий подготовки и проведения анализа слеживаемости гранулированных минеральных удобрений. *Усп. в химии и хим. технологии.* 2021. Т. 35. № 6 (241). С. 79-81.
9. **Ulusal A., Avsar C.** Understanding caking phenomena in industrial fertilizers: A review. *Chem. Biochem. Eng. Quarterly.* 2020. V. 34. N 4. P. 209-222. DOI:10.15255/CABEQ.2020.1866.
10. **Avsar C., Ulusal A.** Granular fertilizer caking: A research on the performance evaluation of coating agents. *Eur. J. Chem.* 2021. V. 12. N 3. P. 273-278. DOI: 10.5155/eur-jchem.12.3.273-278.2120.
11. **Chen M., Zhang D., Dong W., Luo Z., Kang C., Li H., Wang G., Gong J.** Amorphous and humidity caking: A review. *Chin. J. Chem. Eng.* 2019. V. 27. N 6. P. 1429-1438. DOI: 10.1016/j.cjche.2019.02.004.
12. **Гордина Н.Е., Мельников А.А., Гусев Г.И., Гущин А.А., Румянцев Р.Н., Астраханцева И.А.** Использование механохимической и плазмохимической обработок при синтезе каталитических систем на основе вермикулита и оксихлорида циркония. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 43-57. DOI:10.6060/ivkkt.20226505.6612.
13. **Tyc A., Nieweś D., Pankalla E., Huculak-Mączka M., Hoffmann K., Hoffmann J.** Anti-Caking Coatings for Improving the Useful Properties of Ammonium Nitrate Fertilizers with Composition Modeling Using Box-Behnken Design. *Materials.* 2021. V. 14. N 19. P. 5761. DOI: 10.3390/ma14195761.
14. **González-León J.A., Simon F., Besson Ch., Nicol P.** Variables Affecting Caking on Granular Phosphorous Containing Fertilizers (May 18, 2020). SYMPHOS 2019 – 5th International Symposium on Innovation & Technology in the Phosphate Industry. DOI: 10.2139/ssrn.3604187.
15. **Hong W., Peng G., Wu S., Wang J., Yang Z., Ru T.** Effect of Potassium Nitrate on Anti-Caking Performance of AN-based NPK Granular Compound Fertilizer. *Integr. Ferroelectr.* 2020. V. 208. N 1. P. 17-27. DOI: 10.1080/10584587.2020.1728710.
16. **Tyc A., Nieweś D., Penkala S., Grzesik R., Hoffmann K., Hoffmann J.** Influence of anti-caking agents on the highly effective organic coatings for preventing the caking of ammonium nitrate fertilizers. *Coatings.* 2020. V. 10. N 11. P. 1093. DOI: 10.3390/coatings10111093.
17. **Gezerman A.O.** A novel industrial-scale strategy to prevent degradation and caking of ammonium nitrate. *Heliyon.* 2020. V. 6. N 3. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03628.
- mechanisms and prevention. *Powder Technol.* 2018. V. 337. P. 51-67. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.04.052.
4. **Kayahoglu A.** Alternative solutions for the physicochemical evaluation and improvement of the caking properties of calcium ammonium nitrate fertilizer as a quality problem under atmospheric conditions. *J. Chin. Inst. Eng.* 2023. V. 46. N 7. P. 795-804. DOI: 10.1080/02533839.2023.2238778.
5. **Senhaji M. L., Hafnaoui A., Khouloud M., El Agri A., El Arsi M., Boulahna A.** Screening and mixture design applied to formulate anti-caking compositions for reducing the caking tendency of granular phosphate fertilizers. *Mediterr. J. Chem.* 2021. V. 11. N 2. P. 115-125. DOI: 10.13171/mjc02102221569mls.
6. **Haurlyuk A.N., Dormeshkin O.B.** Research of physical and chemical transformations occurring in the volume of granules of integrated mineral fertilizers in the storage process. *Tr. BGUTU. Ser. 2: Khim. tekhnologii, biotekhnologiya, geotekhnologiya.* 2021. N 1 (241). P. 126-138 (in Russian).
7. **Albadarin A.B., Lewis T.D., Walker G.M.** Granulated polyhalite fertilizer caking propensity. *Powder Technol.* 2017. V. 308. P. 193-199. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.12.004.
8. **Nikolaeva N.V., Pochitalkina I.A., Sokolov V.V.** Determination of optimal conditions for preparation and conducting analysis of caking of granulated mineral fertilizers. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2021. V. 35. N 6 (241). P. 79-81 (in Russian).
9. **Ulusal A., Avsar C.** Understanding caking phenomena in industrial fertilizers: A review. *Chem. Biochem. Eng. Quarterly.* 2020. V. 34. N 4. P. 209-222. DOI:10.15255/CABEQ.2020.1866.
10. **Avsar C., Ulusal A.** Granular fertilizer caking: A research on the performance evaluation of coating agents. *Eur. J. Chem.* 2021. V. 12. N 3. P. 273-278. DOI: 10.5155/eur-jchem.12.3.273-278.2120.
11. **Chen M., Zhang D., Dong W., Luo Z., Kang C., Li H., Wang G., Gong J.** Amorphous and humidity caking: A review. *Chin. J. Chem. Eng.* 2019. V. 27. N 6. P. 1429-1438. DOI: 10.1016/j.cjche.2019.02.004.
12. **Gordina N.E., Melnikov A.A., Gusev G.I., Gushchin A.A., Rumyantsev R.N., Astrakhanseva I.A.** Mechanochemical and plasmachemical processing in the synthesis of catalytic systems based on vermiculite and zirconium oxychloride. *Chem. ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 5. P. 43-57. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6612.
13. **Tyc A., Nieweś D., Pankalla E., Huculak-Mączka M., Hoffmann K., Hoffmann J.** Anti-Caking Coatings for Improving the Useful Properties of Ammonium Nitrate Fertilizers with Composition Modeling Using Box-Behnken Design. *Materials.* 2021. V. 14. N 19. P. 5761. DOI: 10.3390/ma14195761.
14. **González-León J.A., Simon F., Besson Ch., Nicol P.** Variables Affecting Caking on Granular Phosphorous Containing Fertilizers (May 18, 2020). SYMPHOS 2019 – 5th International Symposium on Innovation & Technology in the Phosphate Industry. DOI: 10.2139/ssrn.3604187.
15. **Hong W., Peng G., Wu S., Wang J., Yang Z., Ru T.** Effect of Potassium Nitrate on Anti-Caking Performance of AN-based NPK Granular Compound Fertilizer. *Integr. Ferroelectr.* 2020. V. 208. N 1. P. 17-27. DOI: 10.1080/10584587.2020.1728710.
16. **Tyc A., Nieweś D., Penkala S., Grzesik R., Hoffmann K., Hoffmann J.** Influence of anti-caking agents on the highly effective organic coatings for preventing the caking of ammonium nitrate fertilizers. *Coatings.* 2020. V. 10. N 11. P. 1093. DOI: 10.3390/coatings10111093.
17. **Gezerman A.O.** A novel industrial-scale strategy to prevent degradation and caking of ammonium nitrate. *Heliyon.* 2020. V. 6. N 3. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03628.

17. **Gezerman A.O.** A novel industrial-scale strategy to prevent degradation and caking of ammonium nitrate. *Heliyon*. 2020. V. 6. N 3. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03628.
18. **Gorbovskiy K., Kazakov A., Norov A., Malyavin A., Mikhaylichenko A.** Properties of complex ammonium nitrate-based fertilizers depending on the degree of phosphoric acid ammoniation. *Int. J. Ind. Chem.* 2017. V. 8. P. 315-327. DOI: 10.1007/s40090-017-0121-4.
19. **Колпаков В.М., Норов А.М., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Кочетова И.М., Петропавловский И.А.** Влияние степени нейтрализации фосфорной кислоты на свойства нитратсодержащих азотно-фосфорно-калийных удобрений. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 52-58. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6289.
20. **Wu S., Zhao X., Zeng G., Yang Z., Zhang H.** Ammonium polyphosphate combined with potassium nitrate was used to modify the anti-caking property of nitro-compound fertilizer. *Ferroelectrics*. 2024. V. 618. N 11-12. P. 1895-1906. DOI: 10.1080/00150193.2024.2320559.
21. **Кунин А.В.** Закономерности механохимической гидрофобизации моноаммонийфосфата. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 2. С. 87-94. DOI: 10.6060/ivkkt.20216402.6345.
22. ГОСТ 21560.4-76 Удобрения минеральные. Метод определения слеживаемости.
18. **Gorbovskiy K., Kazakov A., Norov A., Malyavin A., Mikhaylichenko A.** Properties of complex ammonium nitrate-based fertilizers depending on the degree of phosphoric acid ammoniation. *Int. J. Ind. Chem.* 2017. V. 8. P. 315-327. DOI: 10.1007/s40090-017-0121-4.
19. **Kolpakov V.M., Norov A.M., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Kochetova I.M., Petropavlovskiy I.A.** Effect on degree of phosphoric acid neutralization on properties of nitrate-containing nitrogen-phosphorous-potassium fertilizers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 3. P. 52-58. DOI:10.6060/ivkkt.20216403.6289.
20. **Wu S., Zhao X., Zeng G., Yang Z., Zhang H.** Ammonium polyphosphate combined with potassium nitrate was used to modify the anti-caking property of nitro-compound fertilizer. *Ferroelectrics*. 2024. V. 618. N 11-12. P. 1895-1906. DOI: 10.1080/00150193.2024.2320559.
21. **Kunin A.V.** Mechanochemical hydrophobization of mono-ammonium phosphate. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 2. P. 87-94. DOI: 10.6060/ivkkt.20216402.6345.
22. GOST 21560.4-76 Fertilizers mineral. Method for determination of caking property. (in Russian).

Поступила в редакцию 04.12.2024

Принята к опубликованию 20.01.2025

Received 04.12.2024

Accepted 20.01.2025