

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.4.12

УДК 661.832

А.А. Хазеев, М.В. ЧерепановаПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ИЗУЧЕНИЕ ТОВАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЦИКЛОННОЙ ПЫЛИ И ГРАНУЛИРОВАННОГО ХЛОРИДА
КАЛИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ОКАТЫВАНИЕМ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ**

Определение товарных характеристик удобрений очень важно для разработки технологической схемы процесса и исходных данных для проектирования производства в целом. Также взаимосвязь характеристик важно учитывать при оценке влияния условий хранения и транспортирования удобрений.

В работе представлены результаты определения статической прочности, среднего размера частиц, угла естественного откоса, продолжительности растворения, гигроскопичности при различной влажности окружающей среды, степени уплотнения и слеживаемости гранулированного хлорида калия, полученного методом окатывания из циклонной пыли при различных условиях. Наиболее прочные гранулы (12,3 и 14,2 Н/гранулу) получены при использовании в качестве связующего 10%-го водного раствора калия кремнекислого с содержанием 12,0 % мас. и при дополнительной подаче упрочняющей добавки – дигидроортофосфата калия.

При определении угла естественного откоса установлено, что гранулируемые со связующим $K_2SiO_3 \cdot nH_2O$ (с добавкой и без нее) образцы имеют меньшую величину данного показателя на 25–26 %.

Наибольшая продолжительность растворения с перемешиванием и без него отмечена у гранулированного хлорида калия, полученного при использовании эффективного связующего и упрочняющей добавки, т.е. увеличение прочности гранул способствует повышению длительности их растворения, а следовательно, сокращает необходимость их ежегодного внесения в почву.

Увеличением длительности выдержки (с 1 до 96 ч) и относительной влажности среды (70, 80, 90 %) в эксикаторе гигроскопичность всех образцов возрастает, при этом максимальная ее величина отмечена у циклонной пыли. Гранулированный хлорид калия с высокой прочностью имеет минимальную гигроскопичность, что объясняется наличием на поверхности гранул плотного (спекшегося) слоя, который затрудняет проникновение влаги внутрь нее.

Степень уплотнения гранулированного хлорида калия – образцы № 2–4 почти в 2 раза выше, чем у исходной пыли. Исходная циклонная пыль при помещении ее в кювету для анализа имеет большую плотность, частицы близко расположены друг к другу.

Слеживаемость гранулированного хлорида калия независимо от вида используемого связующего и присутствия упрочняющей добавки на 35–50 % ниже, чем

у исходной циклонной пыли. Вид связующего, а значит, и качество гранулята – величина статической прочности – значительно влияют на слеживаемость и имеют обратно пропорциональную зависимость.

В ходе проведенных исследований определена взаимосвязь товарных характеристик гранулированного хлорида калия, полученного методом окатывания. Высокая прочность гранулированного KCl 12–14 Н/гранулу благоприятно сказывается на его других товарных характеристиках.

Ключевые слова: гранулированный хлорид калия, статическая прочность, угол естественного откоса, продолжительность растворения, гигроскопичность, относительная влажность среды, степень уплотнения, слеживаемость.

A.A. Khazeev, M.V. Cherepanova

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

**STUDY OF COMMODITY CHARACTERISTICS
OF CYCLONE DUST AND GRANULAR POTASSIUM
CHLORIDE OBTAINED BY PELLETIZING
UNDER VARIOUS CONDITIONS**

Determining the product characteristics of fertilizers is very important for the development of the technological scheme of the process and the initial data for the design of production as a whole. It is also important to consider the relationship of characteristics when assessing the impact of storage and transportation conditions of fertilizers.

The paper presents the results of determining the static strength, average particle size, angle of natural slope, duration of dissolution, hygroscopicity at different ambient humidity, the degree of compaction and caking of granular potassium chloride obtained by rolling from cyclone dust under various conditions. The most durable granules (12.3 and 14.2 N/granule) were obtained when using a 10% aqueous solution of potassium silicic acid with a content of 12.0% by weight as a binder and with an additional supply of a strengthening additive-potassium dihydroorthophosphate.

When determining the angle of natural slope, it was found that the samples granulated with the $K_2SiO_3 \cdot nH_2O$ binder (with or without an additive) have a lower value of this indicator by 25-26 %.

The longest duration of dissolution with and without mixing was observed in granular potassium chloride obtained using an effective binder and strengthening additive. I.e., an increase in the strength of granules increases the duration of their dissolution, and, consequently, reduces the need for their annual application to the soil.

By increasing the exposure time (from 1 to 96 hours) and the relative humidity of the medium (70, 80, 90 %) in the desiccator, the hygroscopicity of all samples increases, while its maximum value is noted for cyclone dust. Granulated potassium chloride with high strength has minimal hygroscopicity, which is explained by the presence of a dense (caked) layer on the surface of the granules, which makes it difficult for moisture to penetrate into it.

The degree of compaction of granular potassium chloride – samples No. 2-4 is almost 2 times higher than that of the original dust. The initial cyclone dust, when placed in a cuvette for analysis, has a high density, the particles are close to each other.

The caking capacity of granulated potassium chloride, regardless of the type of binder used and the presence of a strengthening additive, is 35-50% lower than that of the original cyclone dust. The type of binder, and hence the quality of the granulate – the value of static strength, significantly affect the caking ability and have an inversely proportional relationship.

In the course of the research, the relationship between the commodity characteristics of granular potassium chloride obtained by the pelletizing method was determined. High strength of granulated KCl – 12-14 N/granule, favorably affects its other product characteristics.

Keywords: *granular potassium chloride, static strength, angle of natural slope, duration of dissolution, hygroscopicity, relative humidity, degree of compaction, caking.*

Любая эффективная технология получения гранулированных удобрений должна способствовать получению продукта высокого качества. Именно качество и физико-механические свойства гранулированного минерального или органо-минерального удобрения будет влиять на их поведение в условиях хранения на складе, транспортировании различным видом транспорта на дальние расстояния и внесении в почву с помощью специализированной сельскохозяйственной техники [1, 2]. Поэтому очень важно оценить изменение товарных характеристик (угол естественного откоса, продолжительность растворения, гигроскопичность, слеживаемость) в зависимости от состава гранулируемой смеси. Данные исследования целесообразно проводить до стадии разработки технологии гранулирования.

Объектом исследования служит гранулированный хлорид калия (KCl), полученный методом окатывания из циклонной пыли (ЦП) при ранее установленных технологических параметрах (температура гранулирования 90 °С, длительность окатывания 3 мин, предварительное формование смеси через перфорированные отверстия размером 3,0 мм с давлением формования 0,75 кг/см², сушка гранулята при 150 °С в течение 20 мин) [3, 4]. Получаемый гранулят содержит не менее 95 % мас. хлорида калия (в пересчете на К₂О не менее 60 % мас.). Фото гранулированного KCl, полученного с использованием различных связующих, приведено на рис. 1.

На рис. 1 видно, что гранулированный хлорид калия с водой и калием кремнекислым имеет правильную сферическую форму. На поверхности гранул частицы пыли плотно упакованы. Однако при гранулировании с водой на поверхности гранул отмечены кристаллические

образования – вздутия, уменьшающие объемную плотность окатышей, способствуя образованию дефектов во внутренней структуре и снижению прочности формируемых гранул.

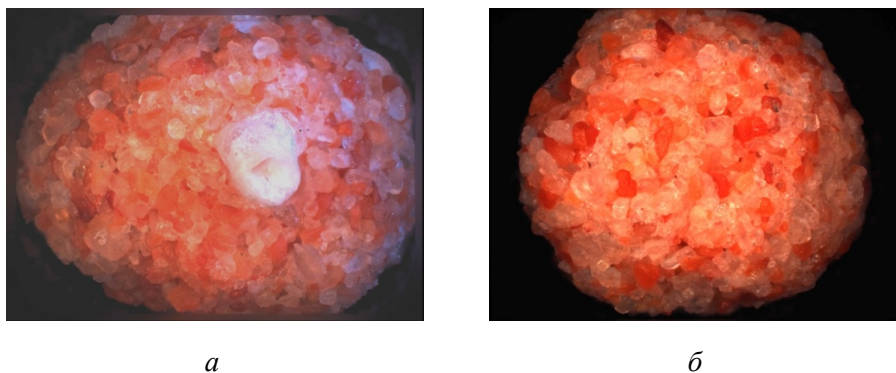


Рис. 1. Поверхность гранул КС1, полученных с различными связующими:
а – вода с содержанием 12,0 % мас.; *б* – 10%-й водный раствор калия кремнекислого с содержанием 12,0 % мас.

В качестве объектов исследований товарных характеристик служили следующие образцы [3]:

№ 1 – циклонная пыль КС1;

№ 2 – гранулят, полученный с использованием в качестве связующего воды с содержанием 12,0 % к массе исходной ЦП;

№ 3 – гранулят, полученный с использованием в качестве связующего 10%-го водного раствора калия кремнекислого с содержанием 12,0 % к массе исходной ЦП;

№ 4 – гранулят, полученный с использованием в качестве связующего 10%-го водного раствора калия кремнекислого с содержанием 12,0 % к массе гранулируемой смеси и упрочняющей добавки дигидроортофосфата калия – 1,65 %.

Данные образцы выбраны для оценки наиболее эффективного связующего (калия кремнекислого) с водой, а также целесообразности использования упрочняющей добавки дигидроортофосфата калия.

Различия данных образцов прослеживаются уже при анализе самых значимых характеристик [3], приведенных в табл. 1.

По данным табл. 1 видно, что в результате окатывания циклонной пыли получен товарный продукт со средним размером частиц 3–4 мм. Использование связующего 10%-го водного раствора калия кремнекислого с содержанием 12,0 % мас. в тукосмеси и упрочняющей до-

бавки позволяет повысить выход готового продукта более чем на 20 % и прочность более чем на 6 Н/гранула.

Таблица 1

Выход товарной фракции, средний размер частиц и статическая прочность исходного сырья и гранулята, полученного при различных режимах

Номер образца	Выход товарной фракции (менее 5,0 – более 0,7 мм), %	Средний размер частиц, мм	Статическая прочность, Н/гранула
1	–	0,13	–
2	61,5	3,1	8,3±0,3
3	83,0	4,1	12,3±0,4
4	85,9	4,3	14,2±0,2

При помещении удобрений на хранение насыпью, проектировании бункеров и складов необходимо знать и учитывать угол естественного откоса. При этом на данный показатель оказывают значительное влияние: шероховатость поверхности гранул, их степень увлажнения, гранулометрический состав и удельный вес [5].

Угол естественного откоса – это угол, образующий конус свободно насыпанного минерального удобрения с горизонтальной плоскостью. Частицы материала, находящиеся на свободной поверхности насыпи, испытывают состояние критического (предельного) равновесия. Угол естественного откоса является также показателем рассеиваемости и напрямую связан с коэффициентом трения [6, 7].

Метод определения угла естественного откоса основывается на определении тангенса угла. Методика эксперимента заключается в следующем: сыпучий материал ссыпали на желоб, который был поставлен на определенной высоте к поверхности стола. После образования насыпи определяли ее высоту и радиус, по величине которых рассчитывали тангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{H}{R}, \quad (1)$$

где H – высота насыпи; R – радиус насыпи.

Радиус определяли по основной насыпи без раскатившихся частиц, высоту измеряли с использованием прямоугольного треугольника и линейки. Величина угла естественного откоса для исследуемых образцов приведена на рис. 2.

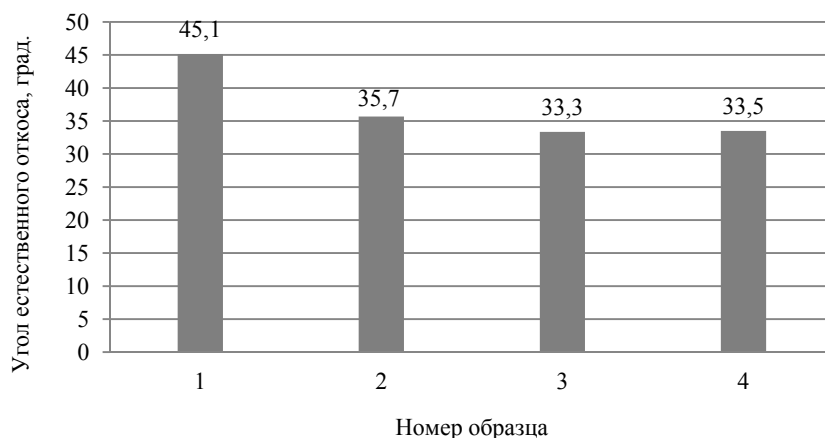


Рис. 2. Угол естественного откоса исследуемых образцов хлорида калия

Величина угла естественного откоса для гранулированного КС1, независимо от используемого связующего и упрочняющей добавки, значительно ниже, чем для исходной циклонной пыли. При этом значения угла естественного откоса для образцов № 3 и 4 практически равны, а у гранулята, полученного с водой, он больше на 7 %.

Циклонная пыль имеет значительно меньший размер частиц по сравнению с гранулятом, они хорошо сцепляются между собой, плохо рассеиваются и образуют большой угол откоса.

Гранулы КС1, наоборот, из-за правильной сферической формы и среднего размера частиц 3–4 мм хорошо рассеиваются, поэтому угол откоса снижается.

При внесении минеральных удобрений в почву целесообразно использовать гранулы пролонгированного действия. Данный показатель имеет прямую зависимость с продолжительностью процесса растворения гранулированного КС1 в почве, а также оказывает значительное влияние на процесс вымывания полезных компонентов (выщелачивание почвы) [8, 9]. При попадании воды в почву питательные вещества минеральных удобрений переходят в растворенное состояние и становятся доступными не только растениям, но и различным факторам среды. В этом случае и возникает вымывание полезных веществ из плодородного слоя.

Исследования проводили в воде, создавая диффузионный режим и моделируя природные условия, без перемешивания и при перемешивании с одинаковой скоростью магнитной мешалки. В обоих случаях фиксировали время начала и конца растворения.

Для увеличения достоверности получаемых данных проводили 10 параллельных измерений для растворения с перемешиванием и без, из которых находили среднее значение продолжительности (рис. 3).

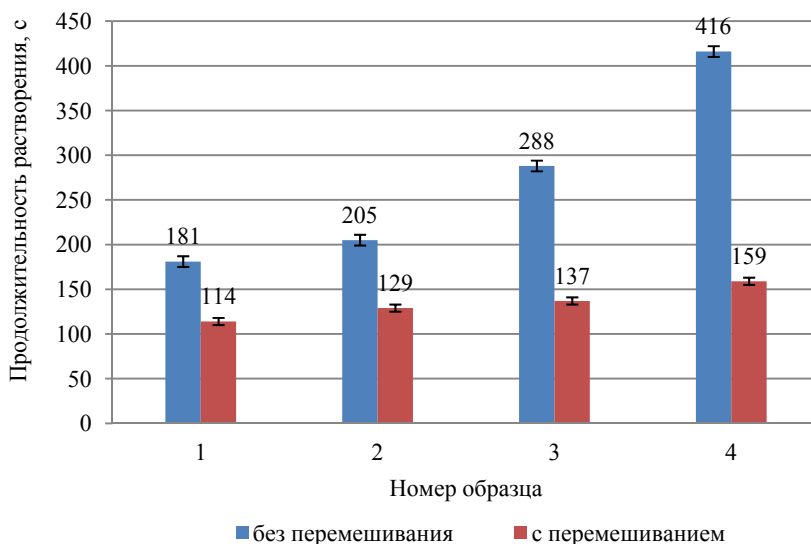


Рис. 3. Продолжительность растворения в воде циклонной пыли и гранулированного хлорида калия, полученного при различных условиях

В результате проведенных исследований установлено, что время растворения в воде (с перемешиванием и без него) гранулята существенно превышает длительность растворения исходной ЦП КС1. Также прослеживается положительное влияние эффективного связующего – 10%-го водного раствора калия кремнекислого и упрочняющей добавки – дигидроортофосфата калия. Полученные данные можно объяснить тем, что гранулы, полученные с добавкой, имеют большую прочность и при погружении в воду имеют своеобразный скелет, который не дает грануле быстро растворяться.

По продолжительности процесса растворения гранулята в воде, в зависимости от вида используемого связующего и добавки, образцы можно расположить в следующей последовательности возрастания длительности процесса растворения: вода < раствор калия кремнекислого < < раствор калия кремнекислого + добавка дигидроортофосфата калия.

Величина продолжительности растворения гранул прямо пропорциональна статической прочности гранул КС1 (x) и описывается эмпирическими уравнениями

без перемешивания

$$y = 96,66 + 15 \cdot x \quad (R^2 = 0,932);$$

с перемешиванием

$$y = 92 + 105,5 \cdot x \quad (R^2 = 0,985).$$

Значительное влияние на условия транспортирования и хранения оказывает гигроскопичность минеральных удобрений, которая характеризует их способность поглощать воду из окружающей среды при определенных значениях температуры и влажности. В основе гигроскопического увлажнения твердого вещества лежит сорбционный процесс с образованием химических, физико-химических и физико-механических связей воды с поверхностью тела. Этот процесс имеет диффузионный характер, а его скорость определяется кинетикой диффузии воды в слой зернистого материала и в глубь единого зерна. При высокой гигроскопичности удобрение сильно слеживается, ухудшается сыпучесть, гранулы теряют прочность и требуют хранения и транспортирования в затаренном виде [10]. Гигроскопичность определена эксикаторным методом при влажности среды 70, 80 и 90 % [1, 6, 10–13]. Результаты исследования гигроскопичности анализируемых образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние влажности среды и длительности выдержки на гигроскопичность образцов

Номер образца	Гигроскопичность образцов через заданное время (ч), %						
	1	2	3	24	48	72	96
<i>Относительная влажность воздушной среды в эксикаторе 70 %</i>							
1	0,007	0,007	0,015	0,059	0,066	0,073	0,073
2	0,006	0,018	0,026	0,026	0,035	0,044	0,047
3	0,005	0,008	0,015	0,023	0,028	0,033	0,033
4	0,002	0,014	0,017	0,025	0,028	0,028	0,028
<i>Относительная влажность воздушной среды в эксикаторе 80 %</i>							
1	0,046	0,065	0,095	0,191	0,198	0,199	0,199
2	0,031	0,040	0,086	0,123	0,153	0,163	0,163
3	0,011	0,024	0,077	0,113	0,143	0,149	0,149
4	0,010	0,018	0,081	0,109	0,141	0,141	0,141
<i>Относительная влажность воздушной среды в эксикаторе 90 %</i>							
1	0,032	0,066	0,109	0,605	1,225	1,838	2,428
2	0,025	0,066	0,099	0,631	1,224	1,823	2,338
3	0,024	0,063	0,102	0,597	1,218	1,854	2,333
4	0,021	0,054	0,099	0,530	1,068	1,632	2,161

По данным табл. 2 видно, что увеличением длительности выдержки и относительной влажности среды в эксикаторе гигроскопичность всех образцов возрастает, при этом циклонная пыль поглощает больше влаги по сравнению с остальными образцами. С увеличением влажности среды гигроскопичность циклонной пыли возрастает, достигая максимума 2,4 % при влажности 90 %.

Образцы № 3 и 4 имеют минимальную гигроскопичность, что объясняется наличием на поверхности гранул плотного (спекшегося) слоя, который затрудняет проникновение влаги внутрь нее. Также следует отметить, что при влажности среды 80 % гигроскопичность образцов № 3 и 4 составляет 0,14–0,15 % через 96 ч выдержки, что не превышает требований ТУ на гранулированный хлорид калия – 0,5 %. Для оценки и прогнозирования поведения удобрений в процессе хранения и транспортирования данные по гигроскопичности очень важны.

Также важной товарной характеристикой удобрений является слеживаемость, которая характеризует склонность твердых веществ переходить в состояния, имеющие более прочное сцепление частиц и максимальную плотность [14].

Слеживаемость зависит от размера и формы частиц, а также от характера их поверхности. На нее влияют наличие примесей в удобрении, высота укладки при хранении, характер воздействия внешней среды (температура, влажность и т.д.) и длительность нагрузки. Слеживаемость удобрений сопоставима с их сыпучестью. При этом сильная слеживаемость ухудшает остальные, определенные ранее, товарные характеристики [1, 2, 13].

Принцип определения слеживаемости заключается в измерении усилия сжатия, необходимого для разрушения спрессованного брикета в форме цилиндра удобрения диаметром 3,5 см и площадью сечения 9,61 см², с заданным усилием и длительностью прессования.

В результате подвергания нагрузки 0,45 кг/см² в течение 10 мин при комнатной температуре определили величину слеживаемости и степень уплотнения образцов. Исследования проводили на анализаторе «АСАР EASY», работа которого контролируется компьютером с помощью программного обеспечения, а все измерения и расчеты проводятся автоматически. Результаты определения слеживаемости и степени уплотнения приведены на рис. 4.

Видно, что слеживаемость гранулированного хлорида калия, независимо от вида используемого связующего и присутствия упрочняющей добавки, значительно ниже (на 35–50 %), чем у исходной циклонной пыли (образец № 1).

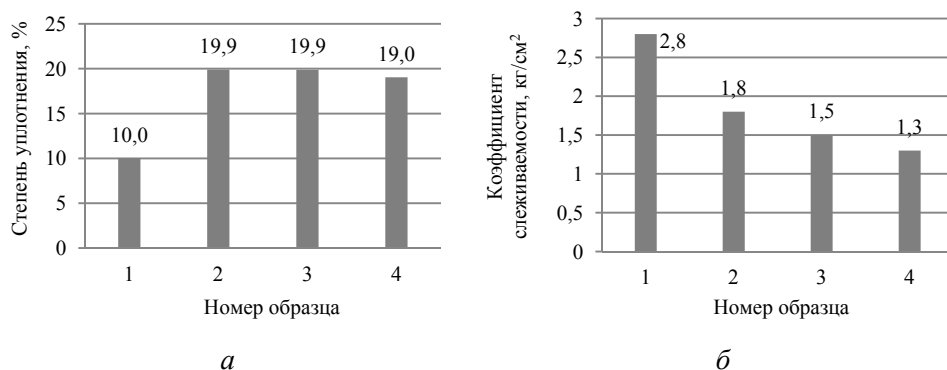


Рис. 4. Результаты определения степени уплотнения (а) и слеживаемости (б) исследуемых образцов

При этом степень уплотнения гранулированного хлорида калия – образцы № 2–4 выше почти в 2 раза, что можно объяснить тем, что частицы исходной циклонной пыли итак уплотнены между собой и близко расположены друг к другу.

Вид связующего оказывает существенное влияние на слеживаемость, при этом она возрастает на 38 % при использовании в качестве связующего воды. А на степень уплотнения слоя вид связующего оказывает меньшее влияние, она изменяется на 4,5 %. При этом в зависимости от вида используемого связующего и добавки можно расположить в следующей последовательности возрастания слеживаемости и степени уплотнения: раствор калия кремнекислого+добавка дигидроортофосфат калия < раствор калия кремнекислого < вода.

Образец № 4, полученный с добавкой и связующим, имеет максимальную прочность и плотность упаковки, и при его сжатии он меньше разрушается, а следовательно, меньше слеживается и уплотняется.

Величина слеживаемости гранул обратно пропорциональна статической прочности гранул КС1 (x) и описывается эмпирическим уравнением вида

$$y = 2,283 - 0,25 \cdot x \quad (R2 = 0,986).$$

В результате проведенных исследований установлена прямая зависимость между товарными характеристиками гранулированных удобрений, в первую очередь статическая прочность, средний размер частиц, которые определяют при исследовании и определении оптимального режима процесса гранулирования ЦП КС1.

Таким образом, чем выше прочность, тем лучше гранулированный продукт будет «показывать» себя при дальнейшем использовании.

С повышением статической прочности снижается угол естественного откоса, увеличивается продолжительность удобрения, следовательно, можно говорить о повышении пролонгированного действия удобрений; гранулы меньше впитывают влагу из окружающей среды и имеют значительно меньшую величину слеживаемости, а значит, будет лучше храниться и транспортироваться.

Определенные значения товарных характеристик гранулированного калийного удобрения использованы для разработки исходных данных для проектирования технологического модуля производства гранулированного КС1 из ЦП мощностью 150 тыс.т в год при непрерывном режиме работы.

Выводы. В результате проведенных исследований установлено, что состав гранулируемой смеси значительно влияет на товарные характеристики гранулята. В ходе исследований на кафедре химических технологий были получены образцы с различными связующими и наличием упрочняющей добавки, отличающиеся основными товарными характеристиками, по которым и определяют оптимальный режим процесса: выход товарной фракции, средний размер частиц, статическая прочность гранул. Наиболее прочные гранулы (12,3 и 14,2 Н/гранулу) получены при использовании в качестве связующего 10%-го водного раствора калия кремнекислого с содержанием 12,0 % мас. и при дополнительной подаче упрочняющей добавки – дигидроортофосфата калия.

При оценке угла естественного откоса образцов определено, что гранулируемый со связующим $K_2SiO_3 \cdot nH_2O$ продукт имеют меньшую величину данного показателя на 25–26 %. Следовательно, гранулы КС1, имеющие большую величину статической прочности и средний размер частиц, отличаются низким углом наклона откоса гранулированного материала, обладают меньшим сцеплением.

При исследовании продолжительности растворения установлена прямая зависимость прочности образцов и длительности процесса с перемешиванием и без него. Прослеживается положительное влияние связующего – 10%-го водного раствора калия кремнекислого и упрочняющей добавки – дигидроортофосфата калия. Продукт, полученный с добавкой, имеет большую прочность (14,2 Н/гранулу), и при погружении в воду имеет своеобразный скелет, который не дает гранулам быстро растворяться.

Минимальная гигроскопичность отмечена у образцов № 3 и 4, имеющих максимальную прочность, благодаря которой на поверхности гранул формируется плотный слой, затрудняющий проникновение влаги внутрь нее. При влажности среды 80 % гигроскопичность образцов № 3 и 4 составляет 0,14–0,15 % через 96 ч выдержки, что не превышает требований ТУ на гранулированный хлорид калия – 0,5 %.

Оценка величины слеживаемости и степени уплотнения удобрений крайне важны для прогнозирования их поведения при хранении и транспортировании. В результате проведенных исследований на анализаторе ACAP EASY установлено, что слеживаемость гранулированного хлорида калия, независимо от вида используемого связующего и присутствия упрочняющей добавки, значительно ниже (на 35–50 %), чем у исходной циклонной пыли (образец № 1). А степень уплотнения гранулированных образцов почти в 2 раза выше из-за того, что частицы ЦП КС1 итак уплотнены между собой и близко расположены друг к другу.

В результате проведенных исследований выявлено, что товарные характеристики гранулированных удобрений значительно взаимосвязаны между собой. Высокая прочность гранулированного КС1, полученного из циклонной пыли методом окатывания, 12–14 Н/гранулу, благоприятно сказывается на его других товарных характеристиках:

- снижается продолжительность растворения в воде, а значит, увеличивается время усвоения растениями;
- уменьшается гигроскопичность, что благоприятно сказывается на хранении и транспортировании удобрений, а также продлении времени работы;
- уменьшается слеживаемость, следовательно, продукт лучше ведет себя при хранении и транспортировании насыпью, не разрушаясь и не изменяя гранулометрический состав.

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Центр наукоемких химических технологий и физико-химических исследований» ПНИПУ.

Список литературы

1. Потапов И.С., Федотова О.А., Пойлов В.З. Моделирование изменений физико-химических характеристик калийных удобрений в процессе хранения и транспортировки морским транспортом [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2390> (дата обращения: 15.10.2020).

2. Влияние условий хранения и транспортировки на физико-механические свойства гранулированного хлорида калия / М.В. Черепанова, И.С. Потапов, В.З. Пойлов, К.В. Попова, С.Н. Алиферова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2012. – № 13. – С. 35–42.

3. Черепанова М.В. Технология гранулирования циклонной пыли хлорида калия методом окатывания: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2013. – 183 с.

4. Cherepanova M.V., Poilov V.Z. Interaction of a potassium silicate binder with impurity components during formation of KCl granules by the pelletizing method // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2017. – Vol. 328, № 10. – URL: http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=C4laD8novVKP8ZMGZA8&page=1&doc=1 (accessed 15 October 2020).

5. НТП АПК 1.10.13.001–03. Нормы технологического проектирования складов твердых минеральных удобрений и химических мелиорантов. – М.: Гипронисельхоз, 2004. – 49 с.

6. Федотова О.А. Разработка технологии получения гранулированных НПК-удобрений методом окатывания на основе сульфата аммония и хлорида калия, содержащего примеси фотореагентов: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2012. – 127 с.

7. ГОСТ 28254–89. Комбикорма, сырье. Методы определения объемной массы и угла естественного откоса. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1991. – 4 с.

8. Позин М.Е., Зинюк Р.Е. Физико-химические основы неорганической технологии. – Л.: Химия, 1985. – 384 с.

9. Технология неорганических веществ и минеральных удобрений / Е.М. Мельников, В.П. Салтанова, А.М. Наумова, Ж.С. Блинова. – М.: Химия, 1983. – 482 с.

10. Кувшинников И.М. Минеральные удобрения и соли: свойства и способы их улучшения. – М.: Химия, 1987. – 256 с.

11. Хамский Е.В. Кристаллические вещества и продукты. Методы оценки и совершенствования свойств. – М.: Химия, 1986. – 224 с.

12. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. – М.: Химия, 1991. – 240 с.

13. Терещенко А.Г. Гигроскопичность и слеживаемость растворимых веществ: моногр. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. – 78 с.

14. Удобрение, стойкое к пылеобразованию и слеживаемости: пат. 2726333 Рос. Федерация / Огзевалла М.Б., Карлини Дж. Р. А.М., Барнат Д.Дж. – № 2018127740; заявл. 12.01.2017; опубл. 13.07.2020, Бюл. № 20. – 20 с.

15. Тыжигирова В.В. Показатели качества и особенности анализа порошков: учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИГМУ, 2016. – 35 с.

References

1. Potapov I.S., Fedotova O.A., Poilov V.Z. Modelirovanie izmenenii fiziko-khimicheskikh kharakteristik kaliinykh udobrenii v protsesse khraneniia i transportirovki morskim transportom [Modeling of changes in the physical and chemical characteristics of the potash fertilizers during storage and transportation by sea]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2014, № 2, available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2390> (accessed 15 October 2020).
2. Cherepanova M.V., Potapov I.S., Poilov V.Z., Popova K.V., Aliferova S.N. Vliianie uslovii khraneniia i transportirovki na fiziko-mekhanicheskie svoistva granulirovannogo khlorida kaliia [Influence of storage and transportation conditions on the physical and mechanical properties of granular potassium chloride]. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaiia tekhnologiia i biotekhnologiia*, 2012, no. 13, pp. 35-42.
3. Cherepanova M.V. Tekhnologiia granulirovaniia tsiklonnoi pyli khlorida kaliia metodom okatyvaniia [Technology for pelletizing cyclone dust of potassium chloride by pelletizing]. Ph. D. thesis. Saint-Petersburg, 2013, 183 p.
4. Cherepanova M.V., Poilov V.Z. Interaction of a potassium silicate binder with impurity components during formation of KCl granules by the pelletizing method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, Iss. 10, available at: http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=C41aD8novVKP8ZMGZA8&page=1&doc=1 (accessed 15 October 2020).
5. NTP APK 1.10.13.001-03. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniia skladov tverdykh mineral'nykh udobrenii i khimicheskikh meliorantov [Norms of technological design of warehouses of solid mineral fertilizers and chemical ameliorants]. Moscow, Gipronisel'khoz, 2004, 49 p.
6. Fedotova O.A. Razrabotka tekhnologii polucheniia granulirovannykh NPK-udobrenii metodom okatyvaniia na osnove sul'fata ammoniia i khlorida kaliia, soderzhashchego primesi fotoreagentov [Development of technology for obtaining granular NPK fertilizers by pelletizing based on ammonium sulfate and potassium chloride containing photoreagent admixtures]. Ph. D. thesis. Perm, 2012, 127 p.
7. GOST 28254-89. Kombikorma, syr'e. Metody opredeleniia ob'emnoi massy i ugla estestvennogo otkosa [Feed, raw materials. Methods for determining the volume mass and angle of natural slope]. Moscow, Gosstandart Rossii: Izd-vo standartov, 1991, 4 p.
8. Pozin M.E., Ziniuk R.E. Fiziko-khimicheskie osnovy neorganicheskoi tekhnologii [Physical and chemical bases of inorganic technology]. Leningrad, Khimiia, 1985, 384 p.
9. Mel'nikov E.M., Saltanova V.P., Naumova A.M., Blinova Zh.S. Tekhnologiia neorganicheskikh veshchestv i mineral'nykh udobrenii [Technology of inorganic substances and mineral fertilizers]. Moscow, Khimiia, 1983, 482 p.

10. Kuvshinnikov I.M. Mineral'nye udobreniia i soli: svoistva i sposoby ikh uluchsheniia [Mineral fertilizers and salts: properties and ways to improve them]. Moscow, Khimiia, 1987, 256 p.

11. Khamskii E.V. Kristallicheskie veshchestva i produkty. Metody otsenki i sovershenstvovaniia svoistv [Crystalline substances and products. Methods for evaluating and improving properties]. Moscow, Khimiia, 1986, 224 p.

12. Klassen P.V., Grishaev I.G., Shomin I.P. Granulirovanie [Granulation]. Moscow, Khimiia. 1991, 240 p.

13. Tereshchenko A.G. Gigroskopichnost' i slezhivaemost' rastvorimykh veshchestv: monografiia [Hygroscopicity and traceability of soluble substances: monograph]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2011, 78 p.

14. Ogzevalla M.B., Karlina DzhR. A.M., Barnat D.Dzh. Udobrenie, stoikoe k pyleobrazovaniuu i slezhivaemosti [Fertilizer that is resistant to dust formation and caking]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2 726 333 (2013).

15. Tyzhigirova V.V. Pokazateli kachestva i osobennosti analiza poroshkov: uchebnoe posobie [Indicators of the quality and features of the analysis of powders: a tutorial]. Irkutsk, Irkutsk state medical University, 2016, 35 p.

Получено 20.10. 2020

Об авторах

Хазеев Алексей Алекович (Пермь, Россия) – студент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: a.xazeev@mail.ru).

Черепанова Мария Владимировна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: syromyatnikova.maria@yandex.ru).

About the authors

Aleksey A. Khazeev (Perm, Russian Federation) – student of the Department of Chemical Technology of the Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: a.xazeev@mail.ru).

Maria V. Cherepanova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: syromyatnikova.maria@yandex.ru).