

УДК 661.833

**О. Б. Дормешкин**

Белорусский государственный технологический университет

**ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ,  
ПРОТЕКАЮЩИХ НА СТАДИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ  
И СУШКИ КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ В ПРИСУТСТВИИ KCl**

Работа посвящена изучению химических превращений, протекающих на стадии гранулирования и сушки комплексных удобрений в зависимости от условий введения хлорида калия. Установлено протекание процессов обменного разложения с участием хлорида калия как при его введении совместно с ретуром, так и при введении в аммонизированную суспензию перед стадией гранулирования. В зависимости от марок получаемых удобрений калий в составе продуктов присутствует в виде сингенита  $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $KH_2PO_4$ , двойных дигидрофосфатов или сульфатов калия-аммония, а также хлорида калия при введении его в избытке. Вследствие образования указанных соединений комплексные удобрения, полученные с введением хлорида калия перед стадией гранулирования и применением методов окатывания в аппаратах барабанного типа, по своим физическим и агрохимическим свойствам превосходят аналогичные марки удобрений, полученных на основе тукосмешения.

**Ключевые слова:** комплексные удобрения, хлорид калия, фазовый состав, химические превращения, гранулирование, сушка, ретур.

**O. B. Dormeshkin**

Belarusian State Technological University

**FEATURES OF CHEMICAL TRANSFORMATIONS  
AT THE STAGE OF GRANULATION AND DRYING  
OF COMPLEX FERTILIZERS IN THE PRESENCE OF KCl**

The work is devoted to the study of the chemical reactions occurring at the stage of granulation and drying complex fertilizers depending on the conditions of introduction of potassium chloride. Set sequences of rate of decomposition involving potassium chloride as with its introduction in conjunction with returom, and with the introduction in ammoniated suspension before to stage of granulation. Depending on marks received fertilizer potassium in products is present in the form of singenita  $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $KH_2PO_4$ , double digidrofosphate or potassium ammonium sulfate, as well as potassium chloride when introducing it in excess. Due to formation of these compounds, compound fertilizers, obtained with the introduction of potassium chloride before the stage of granulation and applying methods of delamination in drum type, physical and agrochemical properties outperform similar brands of fertilizers obtained from other methods.

**Key words:** complex fertilizers, potassium chloride, phase composition, chemical transformations, granulating, drying, retour.

**Введение.** Основным направлением оптимизации ассортимента минеральных удобрений является увеличение объемов производства и применения комплексных удобрений. Так, доля простых фосфорных удобрений в России составляет всего 1,6% в общем объеме производства, а на европейском рынке предлагается свыше 200 марок комплексных удобрений.

С учетом требований основных потребителей – сельского хозяйства, а также мирового рынка минеральных удобрений, начиная с середины 80-х гг. фактически все комплексные удобрения выпускаются только в гранулированном виде.

Основными методами гранулирования комплексных удобрений являются: химическая грануляция; паровая грануляция; компактирование; балк-блендинг. Химическая грануляция,

как правило, включает стадию аммонизации промежуточных фосфорно- (азотно-кислых) суспензий перед подачей в гранулятор либо их непосредственную нейтрализацию в аммонизаторе-грануляторе. Химическая и паровая грануляция относятся к методам гранулирования путем окатывания, причем необходимая для этого пластичность материала создается за счет содержащейся в суспензии жидкой фазы либо путем дополнительного введения жидкой фазы с обратными стоками или в виде пара (паровая грануляция). В США наибольшее распространение получила система bulk-blending, предусматривающая смешение готовых гранулированных удобрений с последующим внесением тукосмесей на поля без перевозки на дальние расстояния. Для исключения эффекта сегрегации и получения гранул «три в одном» после

стадии смешения дополнительно вводятся стадии прессования и дробления. Этот принцип лежит в основе метода компактирования, предусматривающего компактирование предварительно измельченных однокомпонентных удобрений в прессах специальной конструкции с последующим дроблением, просеиванием и дополнительной обработкой. Один из наиболее известных европейских производителей установок компактирования – фирма Кёрперн (Германия). Практически все технологии получения полных комплексных удобрений предусматривают введение калийсодержащего компонента – хлорида калия на стадии гранулирования совместно с ретуром [1] или в аммонизированную суспензию перед ее подачей в гранулятор [2].

Как показал анализ литературы, а также технической документации предприятий, при описании качественного и минералогического составов продуктов указывается присутствие калия в составе хлорида калия [3]. В то же время наличие в гранулируемой смеси жидкой фазы (от 1,5 до 18% в зависимости от метода гранулирования), а также фосфатов аммония, сульфатов кальция и аммония, ряда других солей определяют вероятность протекания на стадии гранулирования и сушки взаимодействия между хлоридом калия, азот- и фосфорсодержащими компонентами. Не исключается протекание топочимических реакций. Необходимость наличия точной информации по минералогическому составу обусловлена также тем, что, согласно требованиям международного регламента REACH, для выхода на рынки стран ЕС необходимо точное указание всех идентификационных показателей, включая химический состав, молекулярную и структурную формулу одно- и многокомпонентных веществ (удобрений).

В связи с этим целью работы, результаты которой представлены в настоящей статье, явилось изучение химических превращений, протекающих на стадиях гранулирования и сушки при получении комплексных удобрений в присутствии хлорида калия.

**Основная часть.** Для проведения исследований были определены следующие базовые марки удобрений: 7:15:19; 10:15:15; 20:15:10;

16:12:20; 12:12:12; 13:13:13; 15:15:15. Выбор базовых марок обусловлен результатами анализа мирового рынка производителей фосфорсодержащих и комплексных удобрений, а также данными Института почвоведения и агрохимии НАН Беларуси о потребности сельского хозяйства Республики Беларусь в комплексных удобрениях. Химические процессы при введении хлорида калия на стадии гранулирования совместно с ретуром изучались на модельных смесях, полученных на основе индивидуальных солей реактивной квалификации. В качестве исходных веществ использовали дигидрофосфат кальция моногидрат  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , дигидрофосфат аммония  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , сульфат аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , хлорид калия  $\text{KCl}$ , карбамид  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  и гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  квалификации «ч. д. а.».

Для получения указанных марок в качестве азотсодержащих компонентов, помимо аммиака и карбамида, предусмотрено использование сульфата аммония, образующегося в результате аммонизации серной кислоты. В качестве фосфорсодержащего компонента при введении хлорида калия в суспензию перед стадией гранулирования предусматривалось использование нерасфильтрованной фосфорно-кислой суспензии, образующейся на стадии разложения фосфатного сырья в экстракторе по технологии, разработанной с участием автора [4]. Корректировка состава отдельных марок осуществляется введением фосфогипса.

Рентгенографическое исследование проводили с использованием дифрактометра «D8 Advance» фирмы «Bruker» (США), ИК-спектры записывали на ИК-Фурье спектрометре NEXUS в области  $300\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ . При расшифровке данных рентгенофазового анализа использовали базу данных [5], отнесение полос ИК-спектров проводили с использованием справочной литературы [6, 7].

Результаты исследований, представленные на рисунке и в табл. 1, 2, подтверждают протекание на стадии гранулирования и сушки конверсионных процессов с участием хлорида калия, а также существенное влияние способа введения  $\text{KCl}$  на химизм и фазовый состав образующихся продуктов.

Таблица 1

**Фазовый состав комплексных удобрений, полученных при введении  $\text{KCl}$  на стадии гранулирования**

Марка удобрения	Идентифицированные фазы
12:12:12	$\text{KCl}$ ; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ; $(\text{NH}_4, \text{K})\text{H}_2\text{PO}_4$ ; $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ; $\text{NH}_4\text{Cl}$ ; $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ; $\text{CaSO}_4$ ; $(\text{K}, \text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
13:13:13	$\text{KCl}$ ; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ; $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$ ; $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ; $\text{NH}_4\text{Cl}$ ; $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
15:15:15	$\text{KCl}$ ; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ; $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; $(\text{K}, \text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ ; $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ; $\text{NH}_4\text{Cl} \cdot \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ; $\text{CaSO}_4$ ; $(\text{K}, \text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Таблица 2

**Фазовый состав комплексных удобрений при введении KCl  
перед стадией гранулирования в аммонизированную суспензию**

Марка удобрения	Идентифицированные фазы
7:15:19	$K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$ ; $NH_4Cl$ ; $(NH_4, K)H_2PO_4$
10:15:15	$K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$ ; $NH_4H_2PO_4$ ; $NH_4Cl$ ; $CO(NH_2)_2 \cdot NH_4Cl$ ; $(K, NH_4)_2SO_4$
15:15:15	$CO(NH_2)_2 \cdot NH_4Cl$ ; $CO(NH_2)_2$ ; $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$ ; $CaSO_4$ ; $(NH_4, K)H_2PO_4$ ; $K_2Ca_5(SO_4)_6 \cdot H_2O$
20:15:10	$CO(NH_2)_2 \cdot NH_4Cl$ ; $CO(NH_2)_2$ ; $CaSO_4$ ; $(NH_4, K)H_2PO_4$ ; $(K, NH_4)_2SO_4$ ; $NH_4Cl$
16:12:20	$CO(NH_2)_2 \cdot NH_4Cl$ ; $CO(NH_2)_2$ ; $KH_2PO_4$ ; $CaSO_4$ ; $(NH_4, K)H_2PO_4$ ; $(K, NH_4)_2SO_4$ ; $KCl$

Анализ фазового состава продуктов, полученных при введении хлорида калия совместно с ретуром непосредственно на стадии гранулирования, позволяет сделать вывод, что в этом случае разложение KCl протекает лишь частично (табл. 1). На это указывает наличие на рентгенограммах пиков высокой интенсивности, соответствующих KCl, а также сульфату и дигидрофосфату аммония. Очевидно, аналогичным будет фазовый состав комплексных удобрений, полученных методом компактирования, а также по балк-блендинг технологии.

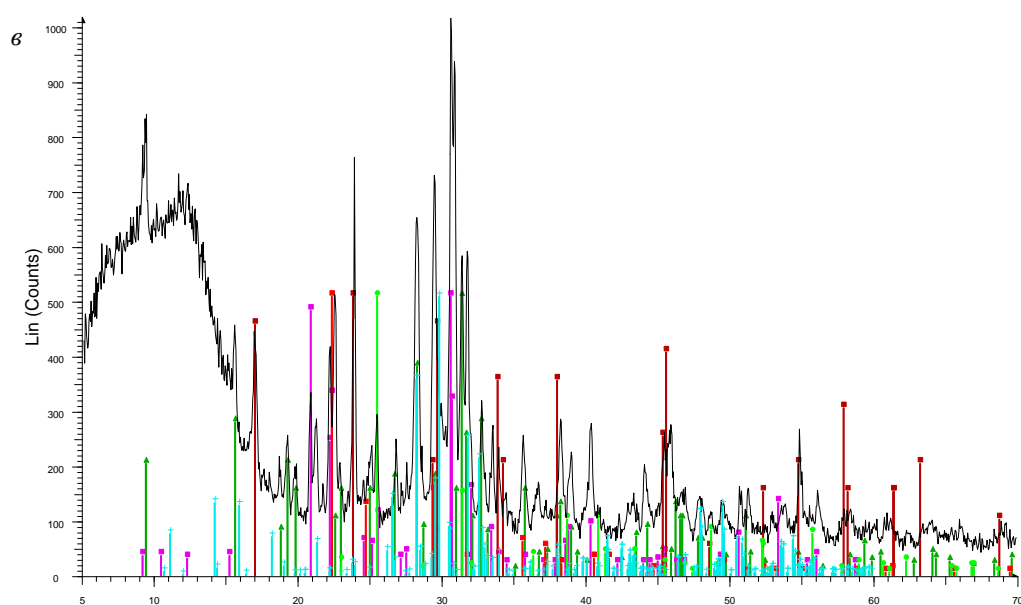
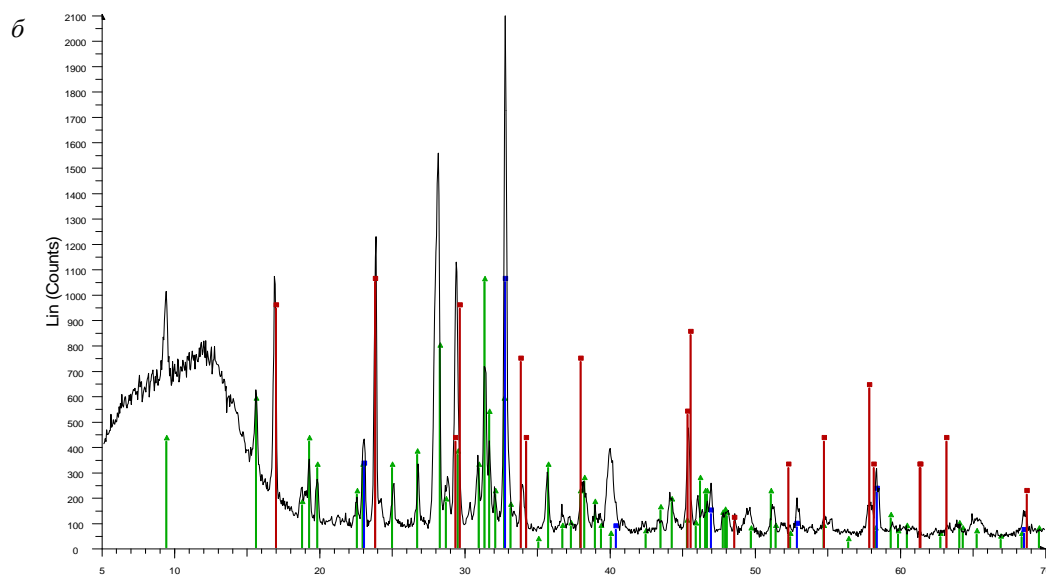
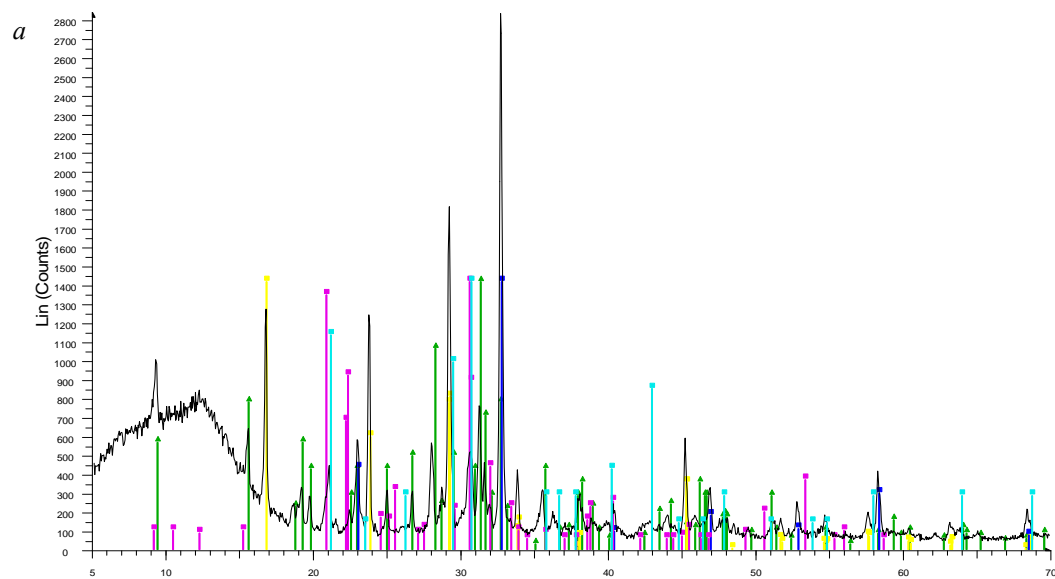
В то же время наличие в составе продуктов двойных солей сульфатов калия-аммония и дигидрофосфатов калия-аммония указывает на частичное протекание конверсии хлорида калия непосредственно в грануляторе. Появление пиков, характерных для гидрофосфата кальция, подтверждает предположение о протекании реакции между дигидрофосфатом аммония и сульфатом кальция. Последний частично может превращаться в гидроксилapatит.

Дополнительное образование гидрофосфата кальция и хлорида аммония будет происходить в результате превращения гипса в сингенит, а также конверсии хлорида калия. Образование гидрофосфата кальция и гидроксилapatита подтверждаются данными, приведенными в работе [8]. Таким образом, введение хлорида калия непосредственно на стадии гранулирования совместно с ретуром приводит к изменению химизма процесса и фазового состава продукта.

Результаты исследований и анализ фазового состава продуктов, полученных при введении хлорида калия в частично или полностью нейтрализованную суспензию перед стадией гранулирования и сушки, доказывают интенсивное протекание процессов между отдельными компонентами системы. В частности, обращает внимание отсутствие рефлексов, характерных для KCl (за исключением марки 16:12:20, содержащей избыточное количество хлорида калия по отношению к карбамиду), что позволяет сделать вывод о практически полной его конверсии.

Соли калия в продуктах представлены в виде сингенита  $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $KH_2PO_4$ , двойных дигидрофосфатов или сульфатов калия-аммония. Причем присутствие в марках удобрений 10:15:15, 15:15:15, 20:15:10 и 20:15:10 карбамида способствует ускорению процесса обменного разложения за счет связывания образующегося хлорида аммония в виде аддукта карбамида с хлоридом аммония и смещением равновесия в сторону продуктов реакции. Это подтверждается присутствием на рентгенограммах удобрений рефлексов, характерных для хлорида аммония или его соединения с карбамидом  $CO(NH_2)_2 \cdot NH_4Cl$ .

Как видно на рисунке, по центру рентгенограммы образцов удобрений марок 10:15:15, 7:15:19, 20:15:10 и 16:12:20 отличаются незначительно, тогда как рентгенограмма образца марки 15:15:15 существенно отличается. Взаимосвязь фазового состава и марки удобрения или, другими словами, зависимость химизма процесса конверсии от соотношения реагентов заключается в следующем. В удобрениях марок 7:15:19 и 10:15:15, в рецептуру которых входит серная кислота, присутствуют сингенит, хлорид аммония, дигидрофосфаты аммония и калия-аммония, а при высоком содержании серной кислоты – сульфаты калия-аммония, при этом сульфаты аммония и кальция не обнаруживаются. В удобрениях марок 20:15:10 и 16:12:20, в рецептуру которых входит карбамид и не входит серная кислота, присутствуют аддукт карбамида с хлоридом аммония, дигидрофосфаты аммония или калия-аммония, сульфаты кальция и калия-аммония, а при добавлении большого количества хлорида калия – дигидрофосфат калия. В то же время сингенит в этих образцах не обнаруживается. Вводимый в процесс карбамид и образующийся в процессе конверсии хлорида калия хлорид аммония в зависимости от условий проведения процесса, количества и соотношения исходных реагентов могут присутствовать в конечном продукте как индивидуально, так и в виде  $CO(NH_2)_2 \cdot NH_4Cl$ .



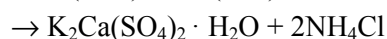
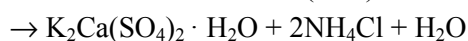
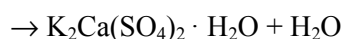
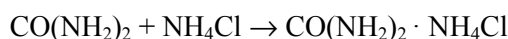
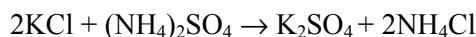
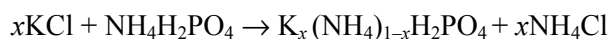
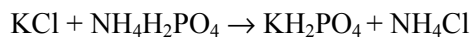
Рентгенограммы марок комплексных NPK удобрений:  
*a* – 10:15:15; *б* – 7:15:19; *в* – 15:15:15

Удобрение марки 15:15:15 является промежуточным между указанными марками: для его получения используется и серная кислота, и карбамид. Фазовый состав этого удобрения наиболее сложен и представлен практически всеми упомянутыми соединениями: дигидрофосфатом и сульфатом калия-аммония, карбамидом и его аддуктом с хлоридом аммония, сингенитом и сульфатом кальция, возможно также присутствие гоергеита  $\text{Ca}_5\text{K}_2(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$  – сульфата калия-кальция с более высоким, по сравнению с сингенимом, содержанием сульфата кальция. Следует отметить, что соединения  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , а также двойные соли разного состава  $\text{K}_x(\text{NH}_4)_{1-x}\text{H}_2\text{PO}_4$  и  $\text{K}_x(\text{NH}_4)_{2-x}\text{SO}_4$  характеризуются близкими межплоскостными расстояниями, и отличия на их рентгенограммах проявляются либо в положении рефлексов малой интенсивности, либо в различной интенсивности основных рефлексов. В особенности это относится к дигидрофосфатам аммония и калия-аммония. Поэтому не исключается присутствие в небольших количествах всех этих соединений. Есть и другие двойные соли, образование которых возможно в данных системах, имеющие близкие рентгенограммы или совпадающие основные межплоскостные расстояния, и поэтому трудно поддающиеся идентификации.

Таким образом, удобрения марок 7:15:19; 10:15:15; 20:15:10; 16:12:20, 15:15:15, полученные при введении хлорида калия перед стадией грануляции в частично либо полностью нейтрализованную фосфорно-кислую суспензию, можно разделить по фазовому составу на два вида. Удобрения, в которых азот присутствует главным образом в аммонийной форме, содержат калий преимущественно в виде сульфата калия-кальция – сингениита. В удобрениях, содержащих большее количество азота в амидной форме, калий присутствует в виде дигидрофосфатов и сульфатов, кроме того, в состав этих удобрений входит сульфат кальция. Фосфор во всех марках удобрений представлен дигидрофосфатами аммония, калия и их двойными солями. Удобрения марок 12:12:12, 13:13:13, 15:15:15, полученных при введении хлорида калия непосредственно на стадии гранулирования совместно с ретуром, содержат калий главным образом в виде хлорида калия. Частичное протекание процесса конверсии на стадии гранулирования и сушки приводит к образованию некоторого количества двойных солей сульфатов калия-аммония и дигидрофосфатов калия-аммония.

По результатам исследования можно сделать вывод, что при получении комплексных НПК удобрений на основе карбамидсодержа-

щей аммонизированной фосфорно-кислой суспензии и введении хлорида калия перед стадией гранулирования с последующей сушкой образующихся суспензий протекают следующие химические реакции:



**Заключение.** Химизм процесса получения комплексных удобрений при введении хлорида калия перед стадией гранулирования в частично или полностью аммонизированные фосфорно-кислые суспензии и фазовый состав образующихся продуктов существенно отличается от состава тукосмесей, смешанных комплексных удобрений, полученных методом компактирования, а также по bulk-blending технологии. Вследствие этого сложносмешанные комплексные удобрения, полученные с введением хлорида калия перед стадией гранулирования и применением методов окатывания в аппаратах барабанного типа по своим физическим и агрохимическим свойствам превосходят аналогичные марки удобрений. Так, прочность гранул составляет 2,5–2,8 МПа, скорость поглощения влаги не превышает 0,37 ммоль  $\text{H}_2\text{O}/(\text{г} \cdot \text{час})$ , т. е. удобрение практически не будет слеживаться при хранении. Поскольку растворимость в воде сингениита невелика (0,25 г/100 г  $\text{H}_2\text{O}$ ), содержащие его удобрения будут обладать свойствами медленно действующих по калию. Полученные гранулы характеризуются однородным составом, без видимых вкраплений хлорида калия. Улучшение физических свойств, вероятно, обусловлено присутствием в исследуемой системе сульфата кальция, а также образованием двойных солей, содержащих сульфат кальция и способствующих формированию на поверхности твердой фазы (гранул) плотной пленки мелких кристаллов сульфатов кальция, которая препятствует выходу на поверхность гранул карбамида и хлорида аммония, в наибольшей степени способствующих возрастанию гигроскопичности и слеживаемости комплексных удобрений.

### Литература

1. Кононов А. В., Стерлин В. Н., Евдокимова Л. И. Основы технологии комплексных удобрений. М.: Химия, 1988. 320 с.
2. Малоотходная технология получения новых видов серосодержащих комплексных NPKS удобрений / О. Б. Дормешкин [и др.] // Труды БГТУ, Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. 2007. Вып. XV. С. 3–8.
3. Технология фосфорных и комплексных удобрений / Под ред. С. А. Эвенчика, А. А. Бродского. М.: Химия, 1987. 464 с.
4. Способ получения гранулированного сложного удобрения: пат. 11661 Респ. Беларусь, МКИ7 С 05В 1/00 / О. Б. Дормешкин, Н. И. Воробьев, В. Е. Первинкин, А. А. Людков, Н. Н. Сеген, А. М. Козлова (РБ), В. Г. Казак, Н. М. Бризицкая, И. Г. Гришаев, А. С. Малявин (РФ). № а 20061142; заявл. 16.11.06; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2008. № 3. С. 99.
5. JCPDS International Centre for Diffraction Data 2003.
6. Свойства и методы идентификации веществ в неорганической технологии / И. М. Жарский [и др.]. Минск: Фонд фундамент. исслед., 1996. 386 с.
7. Lehr J. R. Crystallographic Properties of Fertilizer Compounds. Chem. Eng. Bull, 1967. No. 6. P. 37.
8. Разработать и освоить в опытно-промышленных условиях технологию получения новых марок комплексных удобрений на Гомельском химическом заводе: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. гос. технол. ун-т; рук. темы Н. И. Воробьев. Минск, 1998. 35 с. № ГР 19973189.

### References

1. Kononov A. V., Sterlin V. N., Yevdokimova L. I. *Osnovy tekhnologii kompleksnykh udobreniy* [The basic technology of complex fertilizers]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 320 p.
2. Dormeshkin O. B., Vorobyov N. I., Cheres G. H., Gavrilyuk A. N. Low-technology for producing new types of sulfur-containing complex NPKS fertilizers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series III, Chemistry and Technology of Inorganic Substances, 2007, issue XV, pp. 3–8 (In Russian).
3. Evenchik S. A., Brodskiy A. A. *Tekhnologiya fosfornykh i kompleksnykh udobreniy* [Technology of phosphoric and complex fertilizers]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 464 p.
4. Dormeshkin O. B., Vorobyov N. I., Pervinkin V. Ye., Lyudkov A. A., Segen N. N., Kozlova A. M. (BY), Kazak V. G., Brizitskaya N. M., Grishaev I. G., Malyavin A. S. (RF). *Sposob polucheniya granulirovannogo slozhnogo udobreniya* [Way of getting of granulated complex fertilizers]. Patent BY, no. 11661, 2008.
5. JCPDS International Centre for Diffraction Data 2003.
6. Zharskiy I. M., Vorobyov N. I., Mel'nikova R. J. *Svoystva i metody identifikatsii veshchestv v neorganicheskoy khimii* [The properties and methods of the identification of substances in inorganic technology]. Minsk, Fond fundament. issled. Publ., 1996. 386 p.
7. Lehr J. R. Crystallographic properties of fertilizer compounds. *Chem. Eng. Bull.*, 1967. no. 6, p. 37.
8. *Razrabotat' i osvoit' v opytno-promyshlennykh usloviyakh tekhnologiyu polucheniya novykh marok kompleksnykh udobreniy na Gomel'skom khimicheskom zavode* [Develop and master in experimental-industrial conditions of acquiring new technology marks of complex fertilizers in Gomel chemical plant]: research report (final). Minsk, 1998. 35 p. No. SR. 19973189.

### Информация об авторах

**Дормешкин Олег Борисович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии неорганических веществ и общей химической технологии, проректор по научной работе. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Dormeshkin@yandex.ru

### Information about the authors

**Dormeshkin Oleg Borisovich** – DSc (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Inorganic Materials Technology and General Chemical Technology, Vice-Rector for research. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Dormeshkin@yandex.ru

Поступила 29.02.2016