

ISSN 1561-8331 (Print)  
ISSN 2524-2342 (Online)

**ТЭХНІЧНАЯ ХІМІЯ І ХІМІЧНАЯ ТЭХНАЛОГІЯ**  
**TECHNICAL CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING**

УДК [661.832'053.2+661.846'027.32'053.2].017:53/54  
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-223-232>

Поступила в редакцию 20.11.2018  
Received 20.11.2018

**В. В. Шевчук, Л. В. Диктиевская, Т. П. Соколова,  
Л. Ф. Шломина, Н. И. Позняк**

*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ  
НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
СУЛЬФАТА КАЛИЯ И КАЛИМАГНЕЗИИ**

**Аннотация.** Проведено комплексное исследование важнейших физико-химических и механических свойств (гранулометрический состав, гигроскопичность, слеживаемость, пылимость, уплотняемость, сыпучесть) модельных образцов на основе сульфата калия и опытных образцов сульфата калия и калимагнезии, полученных путем переработки полиминеральной руды в присутствии различных количеств примесных неорганических солей (сульфата и хлорида магния, хлорида натрия). Обладая низкой гигроскопичностью и слабой слеживаемостью, полученные бесхлорные удобрения характеризуются высокой пылимостью. Проведенные исследования влияния пылеподавителей различной химической природы на пылимость модельных и опытных образцов сульфата калия и калимагнезии показали, что наиболее высоким пылеподавляющим действием на указанные удобрения обладает полиэтиленгликоль ПЭГ-400. Использование ПЭГ-400 не оказывает отрицательного влияния на сыпучесть, слеживаемость и уплотняемость удобрений.

**Ключевые слова:** сульфат калия, калимагнезия, гигроскопичность, слеживаемость, уплотняемость, сыпучесть, пылимость, пылеподаватели

**Для цитирования.** Влияние примесей неорганических солей на физико-химические и механические свойства сульфата калия и калимагнезии / В. В. Шевчук [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 223–232. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-223-232>

**V. V. Shevchuk, L. V. Dikhtievskaya, T. P. Sokolova, L. F. Shlomina, N. I. Pazniak**

*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**THE INFLUENCE OF IMPURITY INORGANIC SALTS  
ON THE PHYSICO-CHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES  
OF POTASSIUM SULFATE AND POTASSIUM-MAGNESIA**

**Abstract.** Complex research of the most important physico-chemical and mechanical properties (granulometric composition, hygroscopicity, caking, dusting, compactability, friability) of model system based on potassium sulfate and experimental samples of potassium sulfate and potassium-magnesia has been conducted. The experimental samples of potassium sulfate and potassium-magnesia were obtained in the processing of polymineral ore in the presence of various amounts of impurity inorganic salts (magnesium sulfate and chloride, sodium chloride). The obtained chlorine-free fertilizers have low hygroscopicity and low caking, but they are characterized by high dusting. Studies of the influence of dust-suppressors of different chemical nature on dusting of model and experimental samples of potassium sulfate and potassium-magnesia have shown that polyethylene glycol PEG-400 has the highest dust suppression effect on these fertilizers. Using PEG-400 has no negative influence to the friability, caking and compactability of fertilizers.

**Keywords:** potassium sulfate, potassium-magnesia, hygroscopicity, caking, compactability, friability, dusting, dust-suppressors

**For citation.** Shevchuk V. V., Dikhtievskaya L. V., Sokolova T. P., Shlomina L. F., Pazniak N. I. The influence of impurity inorganic salts on the physico-chemical and mechanical properties of potassium sulfate and potassium-magnesia. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 223–232 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-223-232>

**Введение.** Сульфат калия и калимагнезии являются ценными бесхлорными удобрениями, важным преимуществом которых является наличие в них сульфат-иона, благоприятно воздействующего на рост растений. Сульфат калия и калимагнезии получают двумя способами: конверсионным, где сырьем является хлорид калия, который вступает в реакцию с серной кислотой, сульфатом натрия или аммония, либо путем переработки природного полиминерального сырья. В последнем случае в качестве примесей могут содержаться сульфаты магния (не более 2 %), хлориды магния (не более 2 %) и хлориды натрия (не более 1 %), наличие которых отражается на свойствах бесхлорных калийных удобрений.

Проблема улучшения физико-химических и механических свойств минеральных удобрений является комплексной. С одной стороны, она решается в сфере производства удобрений, где на основе изучения их свойств разрабатываются технические решения, а с другой – в сфере применения, где необходимо оптимизировать условия транспортировки, хранения и внесения продуктов с заданными свойствами. Для характеристики удобрений большое значение имеют следующие свойства: гранулометрический состав, гигроскопичность, слеживаемость, рассеиваемость, сыпучесть, пылимость и др.

Цель работы – исследование влияния примесных неорганических солей, таких как сульфат магния, хлорид магния и натрия на физико-химические и механические свойства сульфата калия и калимагнезии.

**Объекты исследования.** В процессе производства сульфата калия и калимагнезии (высушенный шенит) из полиминеральных руд возможно наличие остаточных количеств сульфатов и хлоридов магния, хлорида натрия. Поэтому первоначально были проведены исследования влияния указанных примесных солей на физико-химические и механические свойства сульфата калия на модельных системах. Модельные системы готовили на основе сульфата калия марки «ч.» путем введения в него определенных количеств указанных солей в виде их водных растворов, высушивания при 120°C в течение 5 ч, охлаждения и растирания до крупности 1 мм. Были приготовлены следующие модельные составы:

- 1)  $K_2SO_4$  обработан водой;
- 2)  $K_2SO_4 + 0,50\% MgCl_2 + 0,25\% NaCl$ ;
- 3)  $K_2SO_4 + 1,0\% MgCl_2$  и  $0,5\% NaCl$ ;
- 4)  $K_2SO_4 + 1,5\% MgCl_2 + 0,75\% NaCl$ ;
- 5)  $K_2SO_4 + 2,0\% MgCl_2 + 1,0\% NaCl$ ;
- 6)  $K_2SO_4 + 0,50\% MgSO_4$ ;
- 7)  $K_2SO_4 + 1,0\% MgSO_4$ ;
- 8)  $K_2SO_4 + 2,0\% MgSO_4$ ;
- 9)  $K_2SO_4 + 1,0\% MgSO_4 + 1,0\% MgCl_2 + 0,5\% NaCl$ ;
- 10)  $K_2SO_4 + 2,0\% MgSO_4 + 2,0\% MgCl_2 + 1,0\% NaCl$ ;

11) калимагнезия 1 (состав: шенит – 69,5 %, лангбейнит – 22,6 %, эпсомит – 4,8 %, гексагидрат сульфата магния – 3,1 %) получена из чистых реактивных солей.

В качестве опытных образцов, полученных из полиминеральной руды, исследованы образцы сульфата калия и калимагнезии следующего состава:

- 12) сульфат калия ( $K_2SO_4$  – 85,7 %, шенит – 13,1 %,  $MgCl_2$  – 0,4 %);
- 13) калимагнезия 2 (шенит – 97,3 %, гексагидрат сульфата магния – 2,0 %,  $MgCl_2$  – 0,8 %,  $NaCl$  – 0,05 %);
- 14) калимагнезия 3 (шенит – 87,0 %, гексагидрат сульфата магния – 4,8 %, эпсомит – 8,2 %);
- 15) калимагнезия 4 (шенит – 48,5 %, леонит – 48,2 %, гексагидрат сульфата магния – 2,8 %, каинит – 0,5 %);
- 16) калимагнезия 5 (леонит 84,6 %, гексагидрат сульфата магния – 7,2 %, сильвин – 8,2 %).

**Методы исследования.** Оценку качества калийных удобрений проводили путем комплексного исследования их основных физико-химических свойств: фракционный состав, гигроскопичность, слеживаемость, пылимость, сыпучесть, уплотняемость [1]. Фракционный состав определяли методом ситового анализа, заключающимся в разделении материала по фракциям путем встряхивания определенной навески материала на механических ситах в течение определенного

времени. Непременным условием ситового анализа является сухость удобрений. Гигроскопичность оценивали по гигроскопической точке, определяемой эксикаторным методом «по Пестову» [2]. Слеживаемость определяли по стандартной методике (ГОСТ 21560.4–76) по величине раздавливающего усилия на брикет удобрения, предварительно увлажненного водой до определенной влажности и выдержанного в пресс-формах при давлении 1,6 кгс/см<sup>2</sup> и температуре 60 °С в течение определенного времени. Уплотняемость определяли путем просеивания образца, разрушенного при изучении слеживаемости на сите с величиной отверстий 1,6 мм. За величину уплотняемости принимали массовый процент продукта, оставшегося на сите. Текучесть (сыпучесть) определяли по методу Меринга путем измерения времени истечения определенной навески (100 г) из стеклянной воронки диаметром 10 см с выпускным отверстием 1,5 см при температуре 20 °С. Определение пылимости удобрения проводили в стеклянной колонке высотой 35 см путем создания псевдооживленного воздухом кипящего слоя высотой 10 см с одновременным улавливанием пыли матерчатым фильтром. Использовали также упрощенный метод оценки пылимости: по содержанию фракции –0,1 мм в продукте.

**Экспериментальная часть.** Основными параметрами гигроскопических свойств удобрений являются: 1) гигроскопическая точка,  $h$ ; 2) скорость поглощения влаги при 100 %-ной влажности за определенный промежуток времени,  $Q$ ; 3) кинетическая константа или коэффициент поглощения,  $K$ . Эти параметры находят графически из зависимостей  $Q = f(h)$ . На рис. 1 в качестве примера представлены зависимости скорости поглощения влаги за 1 ч опытными образцами калимагнезии фракции (–1+0) мм при различных относительных влажностях воздуха, а в табл. 1 внесены гигроскопические параметры модельных и опытных образцов, определенные графически из зависимостей  $Q = f(h)$ . Как видно, практически все исследованные образцы имеют гигроскопическую точку выше 70 %, что дает основание отнести данные вещества к негигроскопичным

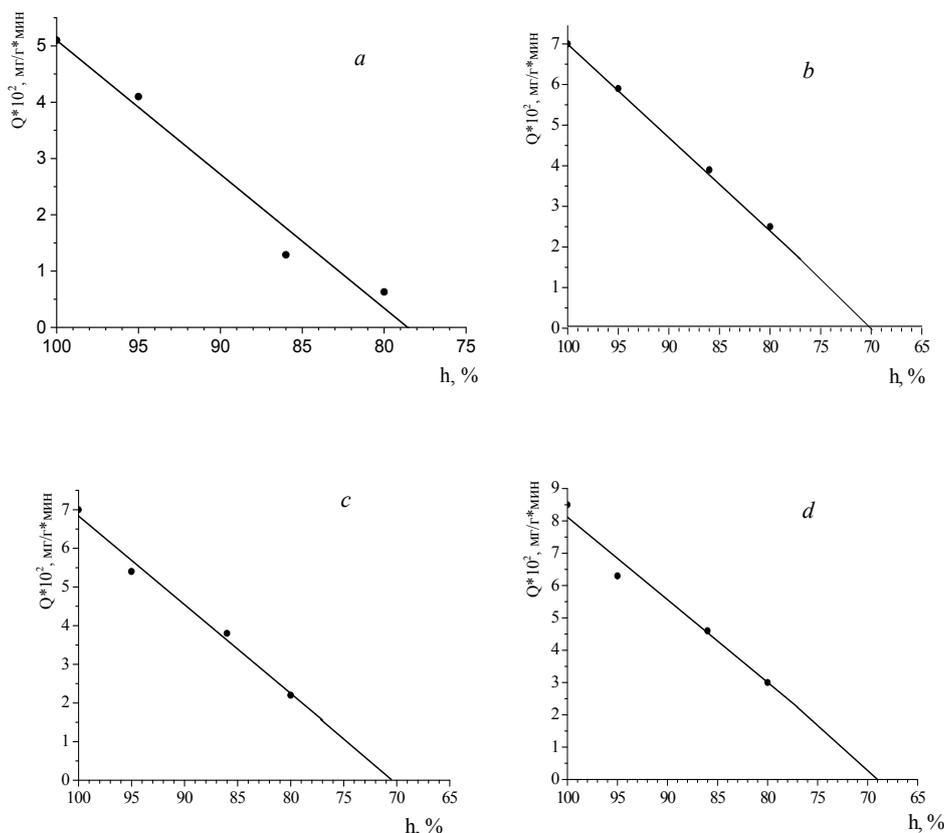


Рис. 1. Зависимость скорости поглощения влаги ( $Q$ ) от относительной влажности воздуха ( $h$ ) для опытных образцов:  $a$  – калимагнезия 2,  $b$  – калимагнезия 3,  $c$  – калимагнезия 4,  $d$  – калимагнезия 5

Fig. 1. Dependence of moisture absorption rate ( $Q$ ) on relative air humidity ( $h$ ) for experimental samples:  $a$  – potassium-magnesia 2,  $b$  – potassium-magnesia 3,  $c$  – potassium-magnesia 4,  $d$  – potassium-magnesia 5

или слабогигроскопичным веществам. Так, если гигроскопическая точка сульфата калия марки «ч.» имеет значение 92 %, то после введения в него определенных количеств сульфатов и хлоридов магния, а также хлорида натрия, его гигроскопическая точка снижается на 10–20 %. Причем наибольшее снижение показывают примеси сульфата магния. Опытный образец сульфата калия характеризуется очень высокой гигроскопической точкой, приближающейся к 100 % и малой скоростью поглощения влаги. Снижение гигроскопической точки связано с повышением скорости влагопоглощения, которая возрастает до 0,034–0,037 мг/(г·мин), против 0,021 мг/(г·мин) для чистого сульфата калия. Это объясняется тем, что присутствующие примеси, особенно это касается хлоридов и сульфатов магния, склонны к образованию кристаллогидратов, что и влечет за собой повышение скорости поглощения влаги и снижение гигроскопической точки соли. Известно, что смеси солей, как правило, более гигроскопичны, чем каждый из компонентов в отдельности. Обычно это связывают с действием закона Рауля, поскольку суммарная концентрация солей в насыщенном растворе смеси выше и давление паров воды соответственно меньше. Основной причиной увеличения гигроскопичности смесей по сравнению с их компонентами является образование точечных дефектов замещения в приповерхностном слое кристаллических блоков и их взаимодействие с дислокациями, выходящими на поверхность кристалла. Аналогичная тенденция прослеживается и на опытных образцах калимагнезии. Те образцы, в которых примеси сульфатов и хлоридов магния выше, характеризуются более низкими гигроскопическими точками и более высокой скоростью поглощения влаги. Кинетическая константа  $K$  для всех образцов изменяется незначительно (в пределах ошибки опыта), так как во всех опытах соблюдались одинаковые условия эксперимента. Однако отмечено, что константа  $K$  увеличивается с повышением размера частиц, влажности продукта, растворимости удобрения.

Таблица 1. Гигроскопические параметры модельных и опытных образцов сульфата калия и калимагнезии  
Table 1. Hygroscopic parameters of model and experimental samples of potassium sulfate and potassium-magnesia

Образец	Гигроскопические характеристики		
	$h$ , %	$Q \cdot 10^2$ мг/(г·мин)	$K \cdot 10^2$ мг/(г·мин %)
Модельные образцы			
$K_2SO_4$ (ч.) – обработан водой	91,0	2,1	0,23
$K_2SO_4$ (ч.)+2 % $MgCl_2$ + 1 % $NaCl$	85,2	3,7	0,25
$K_2SO_4$ +2 % $MgSO_4$	81,9	3,5	0,19
$K_2SO_4$ +2 % $MgCl_2$ + 2 % $MgSO_4$ +1 % $NaCl$	85,8	3,4	0,24
Калимагнезия 1	71,3	6,8	0,23
Опытные образцы			
$K_2SO_4$	98,5	0,1	0,07
Калимагнезия 2	79,2	5,1	0,24
Калимагнезия 3	70,4	6,9	0,23
Калимагнезия 4	70,5	7,0	0,24
Калимагнезия 5	69,3	8,2	0,26

Для полноты картины необходимо знание кинетики сорбции воды удобрениями, поскольку только совокупность статистических и кинетических данных дает возможность оценить скорость процесса и, следовательно, гигроскопичность образца. Как видно из данных, приведенных на рис. 2, примесные соли в большей или меньшей степени способствуют повышению влагопоглощения с течением времени. Так, если чистый сульфат калия за сутки поглотил 0,38 г воды на 100 г образца, то в присутствии 2 % хлорида магния и 1 % хлорида натрия этот показатель повысился до 0,62, в присутствии 2 % сульфата магния – до 0,64, смеси 2 % хлорида магния, 2 % сульфата магния и 1 % хлорида натрия – до 0,68. С течением времени эти изменения становятся более показательными. Такое влияние примесных солей связано, во-первых, с их более низкой гигроскопической точкой, во-вторых, с их склонностью к образованию кристаллогидратов, в третьих, с образованием точечных дефектов замещения в приповерхностном слое кристаллических блоков.

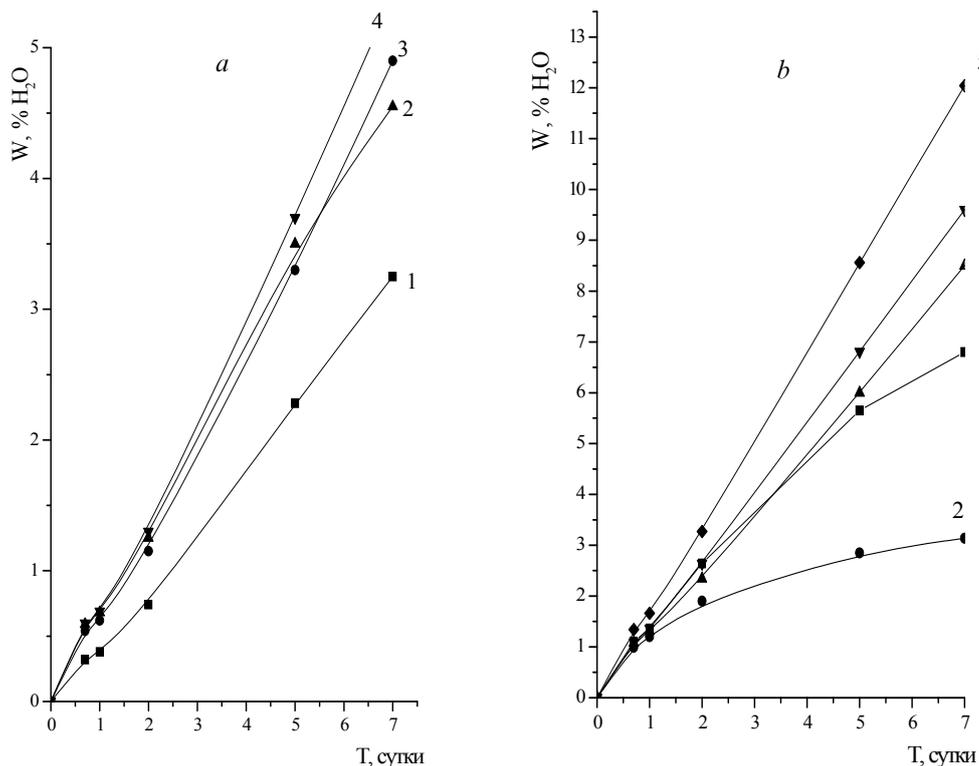


Рис. 2. Кинетические кривые влагопоглощения (г H<sub>2</sub>O /100 г удобрения): *a* – модельных образцов сульфата калия с примесными солями: 1 – K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2 – K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2 % MgCl<sub>2</sub> + 1 % NaCl, 3 – K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2 % MgSO<sub>4</sub>, 4 – K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2 % MgCl<sub>2</sub> + 2 % MgSO<sub>4</sub> + 1 % NaCl; *b* – опытных образцов калимагнезии: 1 – калимагнезия 1, 2 – калимагнезия 2, 3 – калимагнезия 3, 4 – калимагнезия 4, 5 – калимагнезия 5

Fig. 2. Kinetic curves of moisture absorption (g H<sub>2</sub>O /100 g fertilizer) of: *a* – model system of potassium sulfate with impurity salts: 1 – K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2 – K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2 % MgCl<sub>2</sub> + 1 % NaCl, 3 – K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2 % MgSO<sub>4</sub>, 4 – K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2 % MgCl<sub>2</sub> + 2 % MgSO<sub>4</sub> + 1 % NaCl; *b* – experimental samples of potassium-magnesia: 1 – potassium-magnesia 1, 2 – potassium-magnesia 2, 3 – potassium-magnesia 3, 4 – potassium-magnesia 4, 5 – potassium-magnesia 5

Калимагнезии, содержащие большее количество примесных солей, поглощают влаги практически вдвое больше, чем модельные образцы сульфата калия.

Таким образом, установлено, что наличие примесных неорганических солей в составе сульфата калия и калимагнезии хотя и способствует некоторому повышению влагопоглощения, однако исследованные модельные и опытные образцы характеризуются высокой гигроскопической точкой и низкой скоростью поглощения влаги из воздуха и относятся к негигроскопичным (сульфат калия) или слабогигроскопичным (калимагнезии) удобрениям и для них не требуется специальной защиты от атмосферной влаги, их можно хранить в любых сухих помещениях в незатрагиваемом виде.

В табл. 2 представлены результаты влияния примесных солей на слеживаемость сульфата калия и калимагнезии (влажность образцов создавали искусственно путем опрыскивания их водой и перемешивания). В табл. 3 представлены результаты влияния примесных солей на слеживаемость опытных образцов калимагнезии. В данном случае влажность создавали путем выдерживания образцов при влажности 94 % в течение 5 сут. Как видно, опытные образцы калимагнезии характеризуются более высокой слеживаемостью по сравнению с сульфатом калия. Это объясняется разнообразием их составов, представленных различными минералами и солями. Как известно, смеси солей более гигроскопичны и сильнее слеживаются, чем каждый из компонентов в отдельности. Однако независимо от способа увлажнения образцов, полученные результаты по слеживаемости позволяют отнести сульфат калия без и с примесными солями к группе неслеживающихся удобрений, а калимагнезии – к группе слабослеживающихся удобрений согласно ГОСТ 21560.4–76. В связи с этим не требуется специальных мероприятий для обеспечения их сохранности при хранении, транспортировке и применении.

Таблица 2. Слеживаемость модельных и опытных образцов сульфата калия и калимагнезии (влажность создавалась путем опрыскивания образцов водой)

Table 2. Caking of model and experimental samples of potassium sulfate and potassium-magnesia (moisture was created by spraying samples with water)

Образец и его состав	Влажность образца, % воды	Слеживаемость, кПа
Модельные образцы		
$K_2SO_4$ (ч.)	5,0	30,4
$K_2SO_4$ (ч.)	10,0	72,4
$K_2SO_4$ (ч.) + 2 % $MgCl_2$ + 1 % $NaCl$	5,0	35,1
$K_2SO_4$ +2 % $MgSO_4$	5,0	23,4
$K_2SO_4$ + 2 % $MgCl_2$ + 2 % $MgSO_4$ +1 % $NaCl$	5,0	32,7
Калимагнезия 1	5,0	120,4
Опытные образцы		
Калимагнезия 2	5,0	114,2
Калимагнезия 3	5,0	125,0
Калимагнезия 4	5,0	145,3
Калимагнезия 5	5,0	130,4

Таблица 3. Результаты исследования слеживаемости образцов калимагнезии (влажность создавалась путем выдерживания образцов во влажной атмосфере (94 %) в течение 5 сут)

Table 3. The results of caking studies of potassium-magnesia samples (moisture was created by storage of the samples in moist atmosphere (94 %) for 5 days)

Образец и его состав	Влажность образца, % воды	Слеживаемость, кПа
Калимагнезия 1	5,65	128,6
Калимагнезия 2	2,85	57,4
Калимагнезия 3	6,01	139,6
Калимагнезия 4	6,81	162,0
Калимагнезия 5	8,56	190,2

Знание фракционного состава минеральных удобрений важно как для научных исследований, так и для практических целей. Практически все физико-химические и механические свойства удобрений, как-то гигроскопичность, слеживаемость, пылимость и др., определяются и тесно связаны с фракционным составом удобрений. В табл. 4 представлены результаты фракционного состава модельных и опытных образцов сульфата калия и калимагнезии. Видно, что как модельные системы, так и опытные образцы различны по фракционному составу, но все содержат значительное количество пылевидных фракций ( $-0,1+0$ ) мм. Вода и водные растворы хлоридов и сульфатов магния и натрия приводят в большей или меньшей степени к агломерации порошкообразного сульфата калия, что отражается на повышении содержания фракции ( $-1+0,5$ ) мм и снижении пылевидной фракции ( $-0,1+0$ ) мм. Так, если в исходном сульфате калия содержание фракции ( $-0,1+0$ ) мм составляет около 25 %, то после обработки его водой или водными растворами солей этот показатель снижается на ~10 % и составляет около 12–16 %. И соответственно содержание фракции ( $-1+0,5$ ) мм возрастает до 20–30 %, против 4 % – для исходного сульфата калия.

Современные требования к качеству минеральных удобрений, в том числе и к сульфату калия и калимагнезии предусматривают их низкую пылимость, обеспечивающую экологические нормы при транспортировке, складировании и использовании. Так, согласно техническим условиям на мелкодисперсный сульфат калия и калимагнезию их пылимость не должна превышать 0,2 кг/т удобрения. Столь низкое содержание пылевых частиц в готовом продукте может быть достигнуто обеспыливанием удобрения в пневмосепараторах и дополнительной обработкой пылеподавителями различного химического состава. Следует отметить, что обработка пылеподавителем не должна отрицательно влиять на другие физико-химические свойства готовой продукции, такие как сыпучесть, гигроскопичность и слеживаемость.

Таблица 4. Фракционный состав модельных и опытных образцов сульфата калия и калимагнезии  
 Table 4. Fractional composition of model and experimental samples of potassium sulfate and potassium-magnesia

Образец	Содержание фракций, %			
	-1+0,5	-0,5+0,25	-0,25+0,1	-0,1+0
Модельные образцы				
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – исходный (ч.)	4,3	10,3	60,7	24,7
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ч.) – обработан водой	30,6	27,4	27,9	14,1
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ч) + 2 % MgCl <sub>2</sub> + 1 % NaCl	28,0	26,3	29,4	16,3
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2 % MgSO <sub>4</sub>	30,4	23,9	33,0	12,7
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2 % MgCl <sub>2</sub> + 2 % MgSO <sub>4</sub> + 1 % NaCl	25,4	29,2	31,4	14,0
Калимагнезия 1	17,5	16,7	51	14,8
Опытные образцы				
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,5	40,2	47,6	4,7
Калимагнезия 2	6,0	30,7	50,5	12,9
Калимагнезия 3	14,0	24,5	39,4	22,1
Калимагнезия 4	13,2	28,9	42,5	15,4
Калимагнезия 5	15,2	17,7	41,7	25,4

В мировой и отечественной научной и патентной литературе имеется относительно небольшое количество публикаций, освещающих вопросы пылеподавления сульфата калия и калимагнезии. Однако пылеподавлению хлорида калия посвящено достаточное количество работ [3–13]. В основу подбора пылеподавителей для сульфата калия и калимагнезии были выбраны пылеподаватели, рекомендуемые для хлорида калия.

Механизм действия пылеподавителей обусловлен смачиванием поверхности частиц сульфата калия (или калимагнезии) и образованием жидкостных контактов между ними, приводящими к агломерации мелкодисперсных частиц в более крупные. Эффективность пылеподавителя зависит от величины сил адгезии между пылеподавателем и поверхностью частиц удобрения, а также от величины сил когезии между молекулами пылеподавителя. При недостаточно больших силах адгезии пылеподавителя к поверхности частиц и сил его когезии жидкостные контакты между частицами недостаточно прочны для образования агломератов пылеобразных частиц, а образовавшиеся агломераты легко разрушаются уже при слабом механическом воздействии. При высоких значениях этих сил вместе с образованием агломератов частиц будет образовываться сплошная объемная структура в складированном массиве сульфата калия с потерей его текучести (сыпучести). Степень агломерации мелкодисперсных частиц зависит от величины удельного расхода применяемого пылеподавителя, оптимальное значение которого определяется опытным путем. Количественная теоретическая оценка необходимых сил адгезии и когезии, обеспечивающих образование агломератов мелкодисперсных частиц при сохранении текучести продукта, в настоящее время не представляется возможным. В связи с этим поиск эффективных пылеподавителей для удобрений и определение оптимальных условий их применения осуществляется эмпирическим путем.

В качестве пылеподавителей сульфата калия и калимагнезии исследованы следующие технические продукты: ПЭГ-400 (ТУ 2483–007–71150986), Оксаль (ТУ 38.103429–83), промышленные масла И-20А, И-30А, И-40А, И-50А (ГОСТ 20799–88), ГАЧ (ТУ 38.401166–90), экстракт нефтяной (ТУ 0258–134–00148636–2004), пластификатор нефтяной (масло ПН-6) (ТУ 38.1011217–89).

Обобщая полученные данные по влиянию пылеподавителей различной химической природы на пылимость мелкодисперсного сульфата калия и калимагнезии, можно констатировать следующее. Все промышленные масла не обеспечили высокого пылеподавляющего эффекта. Наилучшим пылеподавляющим действием обладают ПЭГ, Оксаль, пластификатор нефтяной ПН, экстракт нефтяной. Однако следует иметь в виду, что пластификатор ПН, экстракт нефтяной наносятся на мелкозернистый продукт подогретыми до 60–80 °С. При этих температурах они приобретают под-

вижность и сравнительно легко распыляются. Кроме того, имея темный цвет, эти пылеподавители окрашивали белый сульфат калия и калимагнезию. Чисто визуально были отмечены явления слипаемости частиц удобрения при использовании указанных нефтепродуктов.

Из всех пылеподавателей выделяется ПЭГ-400, при использовании которого в лабораторных условиях уже при расходе 4 кг/т достигаются нормативные показатели по пылимости как сульфата калия, так и калимагнезии (0,2 кг/т  $K_2SO_4$ ). Полиэтиленгликоль легко растворяется в воде при обычной температуре. Он наносится на поверхность материала в виде водного 50 %-ного раствора, легко смачивает поверхность порошкообразного сульфата калия, не меняет его цвет.

Обработка поверхности дисперсных частиц реагентами различной химической природы может существенно изменять физико-химические свойства дисперсий и, как следствие, потребительские свойства готовой продукции, а именно, текучесть, гигроскопичность, пылимость, уплотняемость и слеживаемость. В связи с этим проведены исследования влияния наиболее эффективного пылеподавателя ПЭГ-400 на указанные свойства сульфата калия и калимагнезии. Полученные данные по влиянию ПЭГ-400 на физико-химические и механические свойства сульфата калия и калимагнезии представлены в табл. 5. Как видно, с увеличением удельного расхода ПЭГ с 3000 г/т до 12000 г/т слеживаемость сульфата калия и калимагнезии практически не изменяется, даже наблюдается незначительное ее снижение, что связано с уменьшением пылевидной фракции. При удельных расходах до 6000 г/т не наблюдается уплотняемости как сульфата калия, так и калимагнезии и только при удельном расходе 8000–12000 г/т происходит образование агрегатов частиц крупнее 1,6 мм в незначительном количестве до 0,5–1 %. Что же касается текучести (сыпучести), то с увеличением удельного расхода пылеподавателей от 3000 до 12000 г/т наблюдается незначительное увеличение времени истечения из воронки навески сульфата калия и калимагнезии, однако продукты сохраняют достаточно высокую текучесть.

Таблица 5. Влияние ПЭГ-400 на физико-химические и механические свойства сульфата калия и калимагнезии

Table 5. The influence of PEG-400 on physico-chemical and mechanical properties of potassium sulfate and potassium-magnesia

Расход пылеподавателя ПЭГ-400, г/т удобрения	Пылимость, кг/т	Влагопоглощение, %, за сутки при 94 %-ной влажности воздуха	Слеживаемость, кПа, при 5 %-ной влажности	Текучесть, с	Уплотняемость (выход фракции + 1,6 мм), %
Сульфат калия, ч. – модельный образец					
0	14,1	0,68	30,4	5,0	0
3000	5,0	0,79	30,0	5,4	0
4000	2,21	0,40	29,5	6,1	0
5000	0,25	0,42	28,5	6,2	0
6000	0,16	0,44	28,0	7,4	0
8000	0,02	0,50	28,6	7,9	0,6
12000	0	0,54	28,0	8,0	1,0
Сульфат калия – опытный образец					
0	4,7	–	2,4	4,4	0
3000	1,80	–	1,6	4,9	0
4000	0,25	–	0	5,2	0
5000	0,15	–	0	5,5	0
6000	0,09	–	0	6,3	0
8000	0,04	–	0	7,0	0,5
12000	0	–	0	7,4	0,9
Калимагнезия 5					
0	25,4	1,36	128,6	8,0	0
3000	18,0	1,49	120,4	5,4	0
4000	10,4	1,58	120,0	6,1	0
5000	5,2	1,80	114,6	7,2	0,7
6000	1,15	2,05	110,5	8,4	0,8
8000	0,2	2,10	105,4	8,9	1,0
12000	0,06	2,80	100,3	10,2	1,2

Таким образом, показано, что обработка сульфата калия и калимагнезии пылеподавателем ПЭГ-400 приводит к некоторому повышению их гигроскопичности, что практически не отражается негативно на слеживаемости, уплотняемости и сыпучести бесхлорных калийных удобрений.

**Выводы.** 1. Проведено комплексное исследование важнейших физико-химических и механических свойств (гранулометрический состав, гигроскопичность, слеживаемость, пылимость, уплотняемость, сыпучесть) модельных систем на основе сульфата калия (марки «ч.») и опытных образцов сульфата калия и калимагнезии, полученных на основе переработки полиминеральной руды в присутствии различных количеств остаточных сульфата и хлорида магния, хлорида натрия.

2. Примесные соли – сульфаты и хлориды магния, хлорид натрия, приводят к снижению гигроскопической точки и повышению скорости поглощения влаги как сульфатом калия, так и калимагнезией. Рекомендуется в процессе производства бесхлорных калийных удобрений обеспечить отсутствие или низкое содержание примесных солей.

3. Установлено, что сульфат калия до 5 %-ной влажности практически не подвержен слеживанию. Примесные соли, в частности сульфаты магния, образуя достаточно крупные малоподвижные водно-солевые комплексы, блокируют активные центры поверхности зерен сульфата калия и тем самым практически не оказывают отрицательного воздействия на слеживаемость основного удобрения. Опытные образцы калимагнезии, полученные путем переработки полиминеральной руды, характеризуются более высокой слеживаемостью в сравнении с сульфатом калия, однако по градации слеживаемости они относятся к слабослеживаемым удобрениям.

4. Исследования пылимости бесхлорных удобрений в присутствии примесных неорганических солей показали, что все образцы содержат значительное количество пылевидных фракций (–0,1+0) мм. Для снижения пылимости полученных удобрений необходимо проводить их обеспыливание в пневмосепараторах и дополнительную обработку специальными реагентами-пылеподавателями. Исследования влияния пылеподавателей различной химической природы на пылимость модельных и опытных образцов сульфата калия и калимагнезии показали, что наиболее высоким пылеподавляющим действием на указанные удобрения обладает полиэтиленгликоль ПЭГ-400. Использование ПЭГ-400 не оказывает отрицательного влияния на сыпучесть, слеживаемость и уплотняемость удобрений.

5. Рекомендуется для снижения пылимости сульфата калия, а также калимагнезии до нормативных показателей (0,2 кг/т удобрения) использовать полиэтиленгликоль (ПЭГ-400) в виде 40–60 %-ного водного раствора. Обработку мелкодисперсного сульфата калия и калимагнезии полиэтиленгликолем производить в смесителе перед складированием удобрения. Для подавления вторичной пылимости перед погрузкой в железнодорожные вагоны удобрение дополнительно следует обработать полиэтиленгликолем.

#### Список использованных источников

1. Кувшинников, И. М. Минеральные удобрения и соли: Свойства и способы улучшения / И. М. Кувшинников. – М.: Химия, 1987. – 256 с.
2. Пестов, Н. Е. Физико-химические свойства зернистых и порошкообразных химических продуктов / Н. Е. Пестов. – Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 238 с.
3. Способ пылеподавления хлористого калия: пат. ВУ 8139 / Н. П. Крутько, А. Д. Маркин, В. В. Шевчук, Л. В. Дихтеевская, Л. Ф. Шломина, А. Н. Башура, В. М. Кириенко, М. М. Варава, А. С. Горбачёв. – Оpubл. 30.06.2006.
4. Способ пылеподавления водорастворимых солей: а.с. SU 1685969 / А. А. Чистяков, Л. Я. Сквирский, Б. К. Тюрин, Ю. А. Ермилов, В. И. Городецкий, З. Л. Козёл, С. А. Чернова. – Оpubл. 23.10.1991.
5. Способ пылеподавления калийного удобрения: пат. RF 2106380 / Л. Я. Сквирский, А. М. Поликша, Р. Х. Саби-ров, Н. П. Фролов, А. М. Вахрушев, С. А. Чернова, З. Л. Козел, Н. А. Скарюкина. – Оpubл. 10.11.1997.
6. Способ получения непылящего калийного удобрения: пат. ВУ 2019535/ Е. И. Грушова, В. Н. Авиллов, М. Г. Шемякина, Г. В. Жевжик, Е. В. Мошкова, М. М. Варава, Л. И. Томчин, Е. И. Щербина. – Оpubл. 15.09.1994.
7. Способ получения обеспыленного хлористого калия: пат. RF 21110504/ С. Н. Титков, А. М. Вахрушев, Е. А. Вайсберг, Н. Н. Макаров, В. Г. Чуянов, А. К. Софьин, Н. А. Скарюкина. – Оpubл. 10.05.1998.
8. Способ получения непылящих минеральных удобрений: пат. RF 2144013 / В. С. Чернов, А. З. Энтентеев, С. П. Дьяков, А. М. Вахрушев. – Оpubл. 10.01.2000.
9. Способ уменьшения пылимости минеральных удобрений: пат. RF 2135436 / Р. Х. Саби-ров, В. А. Новоселов, В. С. Чернов, В. Н. Ершов, П. А. Дерябин, С. Н. Алиферова. – Оpubл. 27.08.1999.

10. Способ получения непылящего мелкозернистого хлористого калия: пат. RF 2057102 / А. В. Давыдов, В. И. Коновалов, Л. В. Сабурова, А. К. Софьин, Н. П. Фролов. – Опубл. 27.03.1996.
11. Procédé de traitement antimottant d'engrais limitant l'émission de poussières au stockage: pat. FR 2727326/ L. Navascues. – Publ. date 31.05.1996.
12. Dust control composition for fertilizer and method of treatment of fertilizer: pat. US 6355083 / Mark B. Ogzewalla. – Publ. date 12.03.2002.
13. Composition for dust control and improved material handling: pat. US 20170044079 / Daniel N.T. Hay. – Publ. date 16.02.2017.

## References

1. Kuvshinnikov I. M. *Mineral fertilizer and salts: Properties and ways of improving*. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 256 p. (in Russian).
2. Pestov N. E. *Physico-chemical properties of grain and powdery chemical products*. Leningrad, Publ. AS USSR, 1947. 238 p. (in Russian).
3. Krutko N. P., Markin A. D., Shevchuk V. V., Dikhtievskaya L. V., Chlomina L. F., Bashura A. N., Kirienko V. M., Varava M. M., Gorbachev A. S. *The way of dust suppression of potassium chloride*. Patent BY 8139. Publ. date 30.06.2006 (in Russian).
4. Chistiakov A. A., Skvirskii L. Ya., Tyurin B. K., Ermilov Yu. A., Gorodeckii V. I., Kozel Z. L., Chernova S. A. *The way of dust suppression of water-soluble salts*. A. c. SU no. 1685969. Publ. date 23.10.1991 (in Russian).
5. Skvirskii L. Ya., Poliksha A. M., Sabirov R. H., Frolov N. P., Vahrushev A. M., Chernova S. A., Kozel Z. L., Skaryukina N. A. *The way of dust suppression of potassium fertilizer*. Patent RF no. 2106380. Publ. date 10.11.1997 (in Russian).
6. Grushova E. I., Avilov V. N., Shemyakina M. G., Zhevzhik G. V., Moshkova E. V., Varava M. M., Tomchin L. I., Scherbina E. I. *The way of obtaining of dustless potassium fertilizer*. Patent BY no. 2019535. Publ. date 15.09.1994 (in Russian).
7. Titkov S. N., Vahrushev A. M., Vaysberg E. A., Makarov N. N., Chuyanov V. G., Sof'in A. K., Skaryukina N. A. *The way of obtaining of dedusted potassium chloride*. Patent RF no. 21110504. Publ. date 10.05.1998 (in Russian).
8. Chernov V. S., Ententeev A. Z., D'yakov S. P., Vahrushev A. M. *The way of obtaining of dustless mineral fertilizers*. Patent RF no. 2144013. Publ. date 10.01.2000 (in Russian).
9. Sabirov R. H., Novoselov V. A., Chernov V. S., Ershov V. N., Deryabin P. A., Aliferova S. N. *The way of decreasing of mineral fertilizers dusting*. Patent RF no. 2135436. Publ. date 27.08.1999 (in Russian).
10. Davydov A. V., Konovalov V. I., Saburova L. V., Sof'in A. K., Frolov N. P. *The way of obtaining of dustless fine-grained potassium chloride*. RF no. 2057102. Publ. date 27.03.1996 (in Russian).
11. Navascues L. *Procédé de traitement antimottant d'engrais limitant l'émission de poussières au stockage*. Patent FR no. 2727326. Publ. date 31.05.1996.
12. Daniel N. T. Hay. *Composition for dust control and improved material handling*: Patent US no. 20170044079. Publ. date 16.02.2017.
13. Ogzewalla Mark B. *Dust control composition for fertilizer and method of treatment of fertilizer*. Patent US no. 6355083. Publ. date 12.03.2002.

## Сведения об авторах

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

*Дихтиевская Людмила Валентиновна* – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dixti@yandex.ru

*Соколова Татьяна Петровна* – мл. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь).

*Шломина Людмила Федоровна* – науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: liudmila.shlomina@rambler.ru

*Позняк Наталья Иосифовна* – мл. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: natali\_pozniak@mail.ru

## Information about the authors

*Viacheslau V. Shevchuk* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Chemistry), Head of the Department of Mineral Fertilizers, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shevchukslava@rambler.ru

*Liudmila V. Dikhtievskaya* – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dixti@yandex.ru

*Tatiana P. Sokolova* – Junior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

*Liudmila F. Shlomina* – Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: liudmila.shlomina@rambler.ru

*Natalia I. Pozniak* – Junior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: natali\_pozniak@mail.ru