

УДК 661.634.22:661.8

О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, М. С. Мохорт, А. А. Бышик

Белорусский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ И СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТРУБЧАТЫХ РЕАКТОРОВ ЦЕХА ДВОЙНОГО СУПЕРФОСФАТА ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Представлены результаты исследования химического и минералогического состава комплексных удобрений и солевых отложений трубчатых реакторов цеха двойного суперфосфата ОАО «Гомельский химический завод». Полученные результаты подтверждают предположение о влиянии состава и соотношения исходных компонентов, условий их введения в технологический процесс на качественно-количественный состав целевых продуктов, а также то, что данные химического состава удобрений не позволяют в полной мере охарактеризовать их качество, агрохимическую эффективность и прогнозировать характер перехода питательных элементов в почвенные растворы и растения. Обращает внимание отсутствие в составе образцов фосфатов кальция, являющихся одной из основных фаз комплексных удобрений на основе суперфосфатов. Основное количество сульфат-ионов находится в составе двойных солей сульфатов калия-аммония, сульфата калия. Кроме того, в образце марки 10-20-20:(В, Zn) присутствует значительно большее по сравнению с маркой 8-24-24 количество сульфата калия, что также свидетельствует о протекании вторичных конверсионных процессов с участием хлорида калия и подтверждается существенным снижением его содержания с 32,82 (для марки 8-24-24) до 18,36%, а также незначительным содержанием в образцах сульфата аммония, образующегося на стадии аммонизации серной кислоты, за счет его участия в процессах обменного разложения. По результатам химического анализа отдельных слоев установлено, что основными компонентами являются соединения калия, преимущественно сульфаты и фосфаты. Выполненный по результатам химического и рентгенофазового анализа количественный расчет содержания отдельных фаз отложений для марки 10-20-20:(В, Zn) подтверждает отличие состава солевого осадка от состава целевого продукта (удобрения), а также существенное отличие в составе и содержании отдельных фаз от солевого осадка для удобрения марки 8-24-24. В частности, основное количество калия присутствует в составе сульфата калия, а основное количество фосфора находится в составе гидрофосфата аммония. Отсутствие в составе осадков хлористого калия подтверждает факт протекания вторичных конверсионных процессов на поверхности трубчатого реактора.

Ключевые слова: комплексные удобрения, солевые отложения, минералогический состав, фосфор, калий, азот, трубчатый реактор, конверсия.

Для цитирования: Дормешкин О. Б., Гаврилюк А. Н., Мохорт М. С., Бышик А. А. Исследование минералогического состава комплексных удобрений и солевых отложений трубчатых реакторов цеха двойного суперфосфата ОАО «Гомельский химический завод» // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 1 (289). С. 27–36.

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-289-4.

O. B. Dormeshkin, A. N. Hauryliuk, M. S. Mokhart, A. A. Byshyk

Belarusian State Technological University

STUDY OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION OF COMPLEX FERTILIZERS AND SALT DEPOSITS OF TUBULAR REACTORS OF THE DOUBLE SUPERPHOSPHATE PLANT OF JSC “GOMEL CHEMICAL PLANT”

The results of the study of the chemical and mineralogical composition of complex fertilizers and salt deposits of tubular reactors of the double superphosphate shop of JSC “Gomel Chemical Plant” are presented. The results obtained confirm the assumption about the influence of the composition and ratio of initial components, the conditions of their introduction into the technological process on the qualitative and quantitative composition of target products, as well as the fact that the data on the chemical composition of fertilizers do not allow to fully characterize their quality, agrochemical efficiency and predict the nature of the transition of nutrients into soil solutions and plants. Attention is drawn to the absence of calcium phosphates in the samples, which is one of the main phases of complex fertilizers based on superphosphates. The main amount of sulfate ions is present in the composition of double salts of potassium-ammonium sulfate, potassium sulfate. In addition, the sample of grade 10-20-20:(B, Zn) contains a significantly higher amount of potassium sulfate compared to grade 8-24-24, which also indicates the course of secondary conversion

processes with the participation of potassium chloride and is confirmed by a significant decrease in its content from 32.82 (for brand 8-24-24) to 18.36%, as well as an insignificant content of ammonium sulphate in the samples, formed at the stage of ammonization of sulfuric acid due to its participation in the processes of exchange decomposition. According to the results of chemical analysis of individual layers, it was established that the main component is potassium compounds, mainly sulphates and phosphates. Based on the results of chemical and X-ray phase analysis, the quantitative calculation of the content of individual phases of sediments for grade 10-20-20:(B, Zn) confirms the difference in the composition of salt sludge from the composition of the target product (fertilizer), as well as a significant difference in the composition and content of individual phases from salt sludge for fertilizer grade 8-24-24. In particular, the main amount of potassium is present in the composition of potassium sulfate, and the main amount of phosphorus is in the composition of ammonium hydrogen phosphate. The absence of potassium chloride in the composition of sediments confirms the fact of secondary conversion processes on the surface of the tubular reactor.

Keywords: complex fertilizers, salt deposits, mineralogical composition, phosphorus, potassium, nitrogen, tubular reactor, conversion.

For citation: Dormeshkin O. B., Hauryliuk A. N., Mokhart M. S., Byshyk A. A. Study of the mineralogical composition of complex fertilizers and salt deposits of tubular reactors of the double superphosphate plant of JSC "Gomel Chemical Plant". *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 1 (289), pp. 27–36 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-289-4.

Введение. Качество химической продукции, производимой на ОАО «Гомельский химический завод» (далее – ГХЗ), а также на всех других профильных предприятиях стран СНГ, регламентируется соответствующей нормативной документацией – ГОСТ, ТУ и т. д. Среди основных показателей, определяющих качество минеральных удобрений, – содержание основных питательных макро- и микроэлементов, а также ряд физико-механических свойств (слеживаемость, гигроскопичность, прочность и др.). Однако указанные регламентируемые показатели не в полной мере позволяют охарактеризовать качество удобрений, поскольку для оценки агрохимической ценности, кинетики перехода питательных элементов в почвенные растворы и растения, а также изменения свойств удобрений на стадиях длительного хранения и транспортировки, важно знание не только количественных показателей содержания отдельных элементов, но и в виде каких соединений они представлены, т. е. минералогический состав удобрений.

Согласно требованиям, действующим на территории стран Европейского союза (ЕС), для выхода продукции на рынки этих стран продукты (вещества) подлежат процедуре «пре-регистрации» в соответствии с нормативным документом – регламентом REACH. Принципиальным отличием требований регламента REACH от требований отечественных нормативных документов является необходимость указания всех идентификационных показателей веществ, включая молекулярную и структурную формулу одно- и многокомпонентных веществ, ЕС-наименование. Как показали выполненные ранее исследования [1], переход на новые виды сырья и марки удобрений, а также изменения технологического процесса существенно влияют на протекающие химические

процессы и, как следствие, на минералогический состав продуктов.

Современные технологии получения комплексных удобрений включают стадию аммонизации фосфорно- и сернокислых суспензий в трубчатых реакторах, которые на сегодняшний день являются одним из наиболее эффективных видов оборудования. Однако, как показал анализ действующего в цехе двойного суперфосфата (ЦДС) ГХЗ технологического процесса, «узким местом» является образование солевых отложений на внутренних поверхностях трубчатых реакторов, что ведет к снижению производительности, ухудшению тепло- и массообмена, необходимости периодической чистки либо замены трубчатых реакторов.

В связи с изложенным, авторами был выполнен цикл исследований, целью которых явилось изучение химического и минералогического состава новых видов комплексных удобрений, а также солевых отложений, образующихся в трубчатых реакторах ЦДС ГХЗ, и подготовлены рекомендации по предотвращению «зарастания» реакторов.

Основная часть. В качестве объектов исследования выбраны одни из наиболее востребованных на мировом рынке марок полных комплексных минеральных удобрений, а также отложения в трубчатых реакторах, образующиеся при их производстве: – комплексное гранулированное азотно-фосфорно-калийное удобрение марки 8-24-24 (ТУ РБ 400069905.022-2003 «Удобрения азотно-фосфорно-калийные комплексные»);

– комплексное гранулированное азотно-фосфорно-калийное удобрение марки 10-20-20:(B, Zn) (ТУ РБ 400069905.022-2003);

– отложения в трубчатых реакторах, образующиеся при производстве в ЦДС комплексных гранулированных азотно-фосфорно-калийных удобрений марок 8-24-24 и 10-20-20:(B, Zn).

Для проведения количественных и качественных анализов образцы удобрений, представленных заказчиком, анализировали на содержание соответствующих элементов с использованием стандартных методов, регламентируемых нормативной документацией (ГОСТ, ТУ) [2–10]. За результат анализа принимали среднее арифметическое двух параллельных определений, допускаемые расхождения между которыми не превышали 0,2–0,5% при доверительной вероятности $P = 0,95$.

При выполнении исследований использовались следующие приборы и оборудование. Рентгенографическое исследование образцов комплексных удобрений и отложений в трубчатых реакторах проводили с помощью рентгеновского дифрактометра «D8 Advance» фирмы Bruker (США). Межплоскостное расстояние рассчитывали по закону Вульфа – Брэгга. При расшифровке рентгенограмм использовали базу данных [11]. Колориметрические определения выполняли с помощью спектрофотометра SP 8001 (Тайвань), пламенно-фотометрические определения – на пламенном автоматическом фотометре PFP7 фирмы JENWAY (Англия). Для измерения влажности образцов использовали анализатор влажности MA 30 фирмы Sartorius (Германия) или сушильный шкаф FD53 фирмы BINDER (Германия). Колебания температуры не превышали $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Результаты химического анализа исследуемых образцов минеральных удобрений приведены в табл. 1, данные их рентгенофазового анализа – на рис. 1, 2.

Химический анализ исследуемых образцов показал присутствие в составе комплексных удобрений примесей, представленных соединениями фтора, железа и алюминия, количество которых настолько мало, что они не идентифицируются методами рентгенофазового анализа. Из литературы известно, что они присутствуют в виде фосфатов алюминия, железа и фторида кальция. При выполнении расчетов учитывалось, что в марке удобрения 10-20-20:(B, Zn) присутствует бор и цинк. Бор добавляется в виде тетрабората натрия пентаводного, а цинк – в виде оксида цинка.

Присутствие данных соединений в незначительных по отношению к основным веществам количествах не позволяет идентифицировать их методом рентгенофазового анализа. Обращают на себя внимание четкие рефлексы, характерные для хлорида аммония – NH_4Cl , двойных солей калия-аммония, в частности аммонийного арканита – $(\text{K}, \text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, различных нестехиометрических солей серной кислоты, что свидетельствует о протекании химических превращений между отдельными компонентами системы. Возможность образования указанных соединений в исследуемых водно-солевых системах ранее описана авторами в работе [12–15].

Данные о качественном и количественном составе исследуемых удобрений, идентифицированных с использованием различных методов анализа и выполненного расчета баланса по катионам и анионам, приведены в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав образцов азотно-фосфорно-калийных удобрений

Компоненты	Содержание компонентов в удобрении, мас. %	
	марки 8-24-24	марки 10-20-20:(B, Zn)
P_2O_5 общ	23,788	19,768
P_2O_5 уств (в 2%-ной лимонной кислоте)	22,662	17,860
P_2O_5 вод	20,745	16,467
$\text{N}_{\text{общ}}$	8,225	10,801
$\text{N}_{\text{аммон}}$	8,161	10,801
$\text{N}_{\text{амид}}$	–	–
$\text{CaO}_{\text{общ}}$	1,345	1,123
$\text{CaO}_{\text{вод}}$	1,214	0,965
MgO	0,193	0,288
K_2O	23,886	20,340
Na_2O	0,255	1,162
Fe_2O_3	0,248	0,367
Al_2O_3	0,351	0,494
F	0,231	0,485
SO_3 вод	6,844	12,027
SO_3 общ	7,619	14,924
н.о.	0,247	0,126
H_2O	0,674	0,400

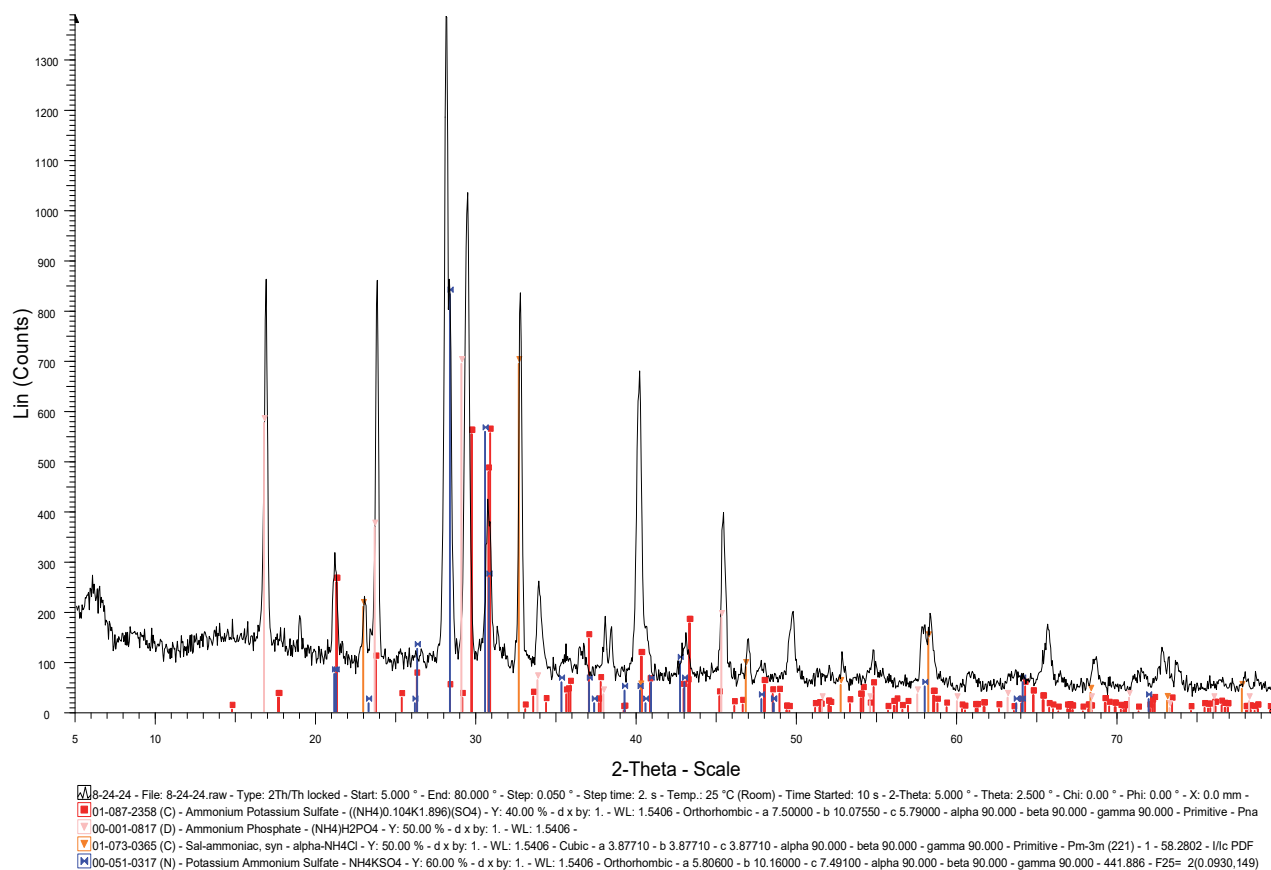


Рис. 1. Рентгенограмма удобрения марки 8-24-24 (основные фазы)

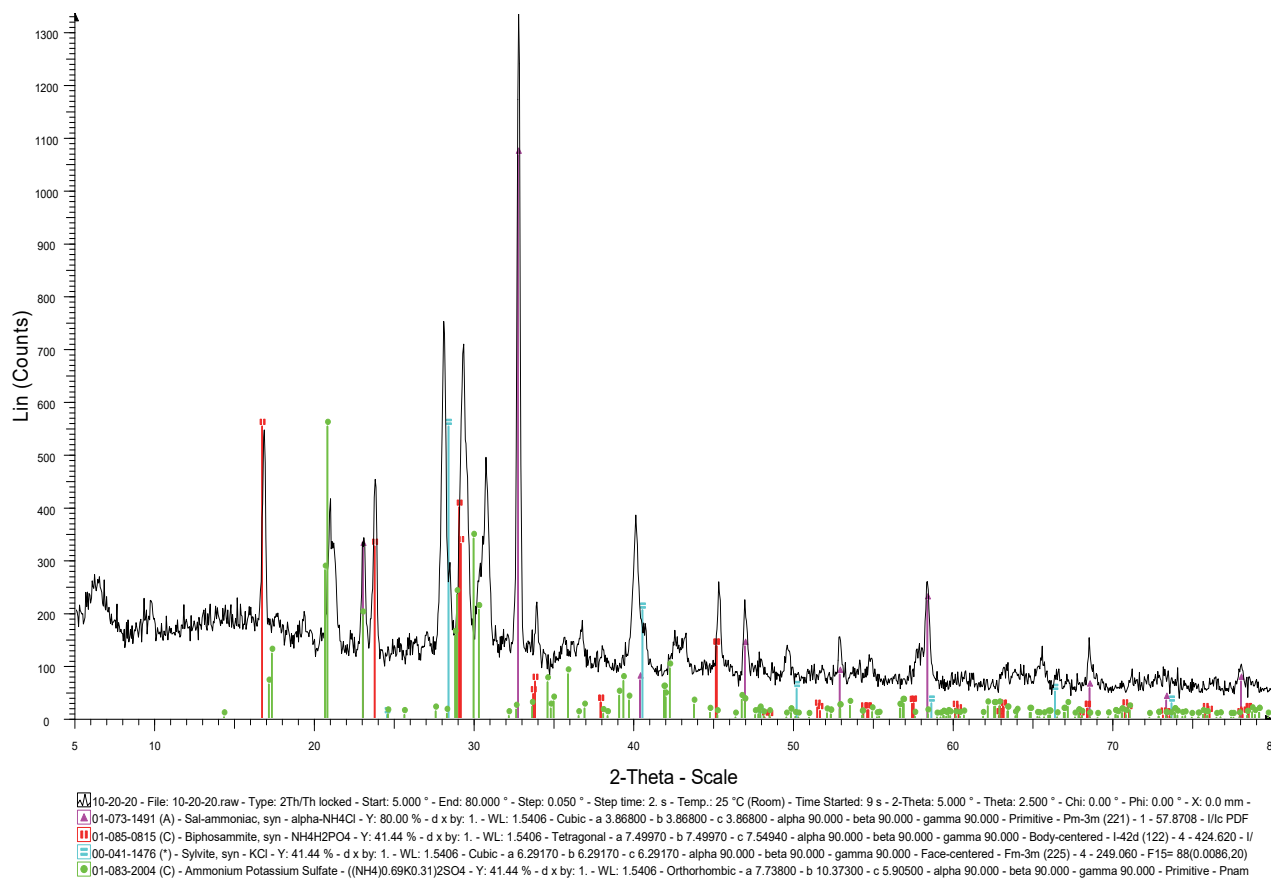


Рис. 2. Рентгенограмма удобрения марки 10-20-20:(B, Zn) (основные фазы)

Таблица 2

Минералогический состав образцов удобрений

Все химические вещества, входящие в состав продукта (включая примеси $\geq 1\%$)	Содержание компонентов в удобрении, мас. %		Молекулярная формула
	марки 8-24-24	марки 10-20-20:(B, Zn)	
Дигидрофосфат аммония	36,71	26,48	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
Хлорид аммония	5,02	8,30	NH_4Cl
Хлорид калия	32,82	18,36	KCl
Сульфат аммония	0,59	0,29	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Двойная соль сульфат калия-аммония	13,31	9,62	$\text{K}_x(\text{NH}_4)_y\text{SO}_4$
Сульфат калия	1,37	21,84	K_2SO_4
Дигидрофосфат калия	0,42	0,61	KH_2PO_4
Сульфат кальция дигидрат	0,12	0,89	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Фторид кальция	0,26	0,91	CaF_2
Фосфат железа	0,25	0,35	FePO_4
Фосфат алюминия	0,47	0,59	AlPO_4
Сульфат магния семиводный	1,34	1,61	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Оксид кремния	0,25	0,12	SiO_2
Тераборат натрия пятиводный	–	4,20	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Оксид цинка	–	0,31	ZnO
Вода	0,67	0,36	H_2O

Обращает внимание отсутствие в составе образцов фосфатов кальция, являющихся одной из основных фаз комплексных удобрений на основе суперфосфатов. Основное количество сульфатионов присутствует в составе двойных солей сульфатов калия-аммония, сульфата калия. Данное, на первый взгляд, несоответствие известным литературным данным о составе суперфосфатов обусловлено принципиальным отличием применяемой в ЦДС ГХЗ технологии, основанной на использовании в качестве фосфорсодержащего компонента нерасфильтрованной серно- и фосфорнокислой суспензии [13]. В результате чего технологический процесс сопровождается протеканием целого ряда реакций обменного разложения между компонентами системы, детально описанными авторами в работах [1, 12]. Кроме того, в образце марки 10-20-20:(B, Zn) присутствует значительно большее по сравнению с маркой 8-24-24 количество сульфата калия (21,84%), что также свидетельствует о протекании вторичных конверсионных процессов с участием хлорида калия и подтверждается существенным снижением его содержания с 32,82 (для марки 8-24-24) до 18,36%, а также незначительным содержанием в образцах сульфата аммония, образующегося на стадии аммонизации серной кислоты, за счет его участия в процессах обменного разложения.

Полученные результаты подтверждают предположение о влиянии состава и соотношения исходных компонентов, условий их введения в технологический процесс на качественно-количественный состав целевых продуктов, а также то, что данные химического состава удобрений не позволяют в полной мере охарактеризовать их

качество, агрохимическую эффективность и прогнозировать характер перехода питательных элементов в почвенные растворы и растения.

При производстве комплексных удобрений на стадии аммонизации в трубчатом реакторе отмечается протекание интенсивного процесса образования солевых отложений на его внутренних поверхностях, что вызывает ухудшение тепло- и массообмена и производительности установки в целом. В связи с чем в рамках настоящей работы был изучен химический и минералогический состав солевых отложений, а также предложены мероприятия по снижению этого негативного явления. Поскольку процесс аммонизации фосфорно- и сернокислых суспензий экзотермический, за счет развития высокой температуры происходит испарение основного количества жидкой фазы (воды), что приводит к интенсивному пересыщению системы и кристаллизации солей на внутренних поверхностях реактора.

На фотографиях поперечных разрезов образцов отложений трубчатых реакторов, переданных заказчиком, наглядно видны отдельные слои, имеющие различные оттенки (рис. 2), что позволяет предположить возможные отличия в их составе. Кроме того, визуально отмечается отличие отложений, образующихся при производстве удобрений марок 8-24-24 и 10-20-20:(B, Zn). По этой причине исследуемые образцы отложений были разделены на несколько отдельных объектов для последующего изучения.

Как видно из рис. 3, все рентгенограммы отложений, образующихся при производстве удобрений марки 8-24-24, практически идентичны, наблюдаются отклонения для отдельных образцов

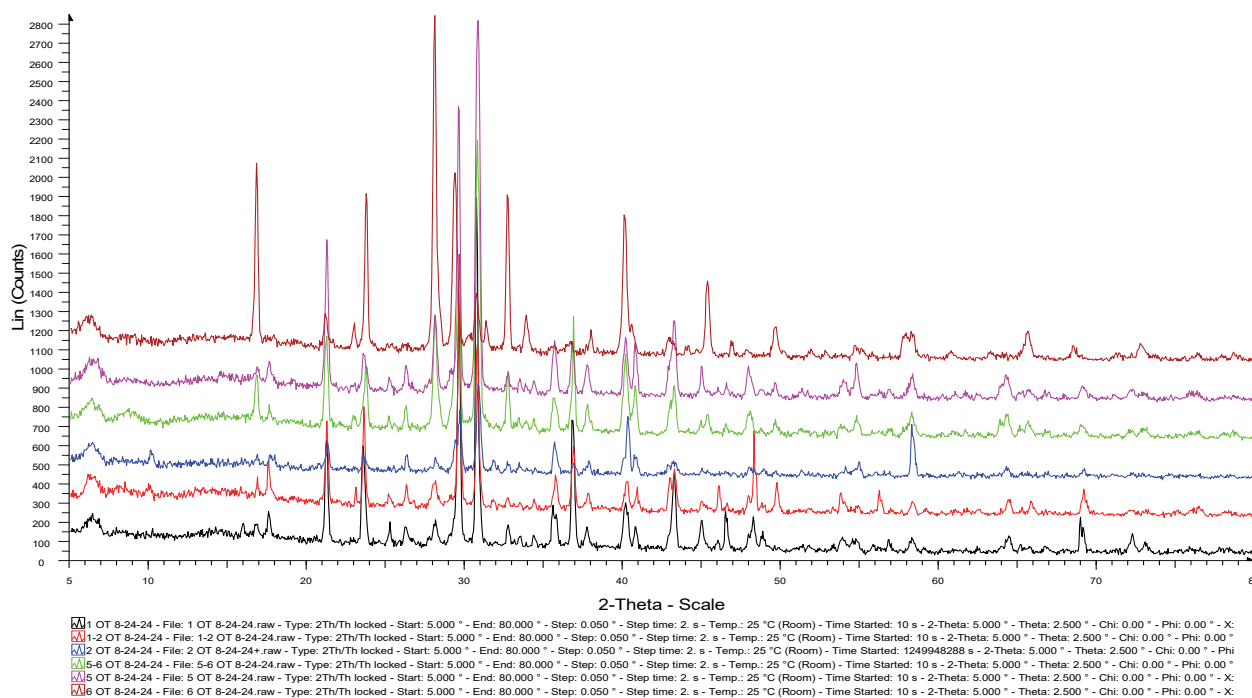


Рис. 3. Рентгенограммы всех слоев отложений из трубчатого реактора, образующихся при производстве удобрения марки 8-24-24

по интенсивности пиков, что позволяет предположить различия в количественном содержании отдельных фаз. Основными фазами отложений трубчатого реактора, полученных при производстве удобрений марки 8-24-24, по данным рентгенофазового анализа являются: $(\text{NH}_4)_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – гексагидрат сульфата магния-диаммония; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ – дигидрофосфат аммония; $\text{K}_{1,896}(\text{NH}_4)_{0,104}(\text{SO}_4)$ – двойная соль сульфат калия-аммония; $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – водный сульфат калия, кальция и магния (полигалит); NH_4Cl – хлорид аммония.

В то же время химический анализ образцов солевых отложений, образующихся при производстве удобрений марки 8-24-24 (табл. 3), позволяет сделать вывод о существенном отличии состава солевых отложений от химического состава продукта, что, вероятно, свидетельствует о

протекании вторичных химических превращений в трубчатом реакторе между первоначально образующимися при аммонизации соединениями. Причем содержание основных компонентов в слоях № 1–5 существенно отличается от их содержания в слое № 6, наиболее глубоким и удаленным от реакционной зоны.

Данные количественного расчета содержания отдельных фаз подтверждают предположение о протекании вторичных химических превращений (табл. 4). В частности, в отличие от целевого продукта (табл. 2), в составе солевых отложений не идентифицируется хлористый калий, а содержание дигидрофосфата аммония значительно ниже (особенно в слоях № 1–5). Основное количество калия в отложениях находится в составе двойной соли – сульфата калия-аммония (от 43,60 до 86,44% в зависимости от слоев).

Таблица 3

Химический состав отложений, образующихся при производстве удобрения марки 8-24-24

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %			
	Слой № 1	Слой № 2	Слой № 5	Слой № 6
P_2O_5 общ	2,298	6,479	4,238	23,386
P_2O_5 усв (в 2%-ной лимонной кислоте)	2,143	5,465	4,232	22,498
P_2O_5 вод	2,105	5,454	4,058	22,167
$\text{N}_{\text{общ}}$	2,812	3,837	3,726	8,754
$\text{CaO}_{\text{общ}}$	0,158	0,267	0,294	0,307
MgO	0,151	0,640	0,266	0,458
K_2O	47,940	43,966	47,943	27,261
Fe_2O_3	2,388	2,964	4,456	5,897
Al_2O_3	2,411	1,125	0,536	0,560
SO_3 общ	12,178	14,751	10,120	11,945
SO_3 вод	12,009	14,465	9,804	11,616

Таблица 4

**Минералогический состав образцов отложений,
образующихся при производстве удобрения марки 8-24-24**

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %			
	Слой № 1	Слой № 2	Слой № 5	Слой № 6
$(\text{NH}_4)_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – гексагидрат сульфата магния-диаммония	0,91	4,67	1,37	3,13
$\text{K}_{1,896}(\text{NH}_4)_{0,104}(\text{SO}_4)$ – двойная соль сульфат калия-аммония	86,44	75,46	81,09	43,60
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ – дигидрофосфат аммония	0,32	6,18	0,46	28,21
$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – водный сульфат калия, кальция и магния (полигалит)	0,64	1,10	1,20	1,24
NH_4Cl – хлорид аммония	4,24	3,75	4,72	9,36
$\text{NH}_4\text{FePO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – гидрофосфат железа аммония	5,51	6,93	10,22	13,06

По результатам химического анализа отдельных слоев видно, что основным компонентом отложений являются соединения калия, преимущественно сульфаты и фосфаты, о чем говорит содержание оксида серы (VI), количество которого в отдельных образцах достигает 18,5 мас. %, и пентаоксида фосфора (табл. 5).

По данным рентгенофазового анализа основными фазами отложений трубчатого реактора, образующихся при производстве удобрения марки 10-20-20:(B, Zn), являются: $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ – гидрофосфат аммония; K_2SO_4 – сульфат калия; $\text{NH}_4\text{FePO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – водный фосфат аммония железа; NH_4Cl – хлорид аммония.

Выполненный по результатам химического и рентгенофазового анализа количественный расчет содержания отдельных фаз отложений, полученных при производстве удобрений марки 10-20-20:(B, Zn), подтверждает отличие состава солевого осадка от

состава целевого продукта (удобрения), а также существенное отличие в составе и содержании отдельных фаз от солевого осадка для удобрения марки 8-24-24 (табл. 6). В частности, основное количество калия присутствует в составе сульфата калия, содержание которого варьирует от 14 до 57%, а основное количество фосфора находится в составе гидрофосфата аммония (от 17,24 до 48,88%). Отсутствие в составе осадков хлористого калия подтверждает факт протекания вторичных конверсионных процессов на поверхности трубчатого реактора, а значительные отличия в составе солевых отложений для удобрений марок 10-20-20:(B, Zn) и 8-24-24 доказывают, что различия в качественном и количественном составе исходных азот-, фосфор- и калийсодержащих компонентов приводят к существенному отличию минералогического состава как целевых продуктов, так и солевых отложений.

Таблица 5

Химический состав отложений, образующихся при производстве удобрения марки 10-20-20:(B, Zn)

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %				
	Слой № 1	Слой № 2	Слой № 3	Слой № 4	Слой № 5
P_2O_5 общ	30,293	15,558	34,455	29,949	26,141
P_2O_5 усв (в 2%-ной лимонной кислоте)	18,392	12,605	11,734	14,623	17,559
P_2O_5 вод	6,034	7,413	6,986	9,468	7,679
$\text{N}_{\text{общ}}$	3,661	4,098	4,386	3,483	5,583
$\text{N}_{\text{аммон}}$	3,661	4,098	4,386	3,483	5,583
$\text{N}_{\text{амид}}$	–	–	–	–	–
$\text{CaO}_{\text{общ}}$	2,894	1,413	2,881	3,085	2,692
$\text{CaO}_{\text{вод}}$	0,191	0,197	0,292	0,095	0,105
MgO	0,296	0,609	0,548	0,724	0,374
K_2O	6,824	30,936	6,473	8,773	17,630
Na_2O	0,868	0,852	0,889	1,703	1,272
Fe_2O_3	8,429	7,133	11,996	6,539	5,605
Al_2O_3	1,807	1,911	2,809	4,251	1,667
F	0,017	0,014	0,005	0,016	0,023
Cl	1,886	2,705	0,970	1,332	1,434
SO_3 общ	14,856	16,527	18,526	13,003	17,227
SO_3 вод	11,755	15,013	15,439	9,698	14,343
н.о.	0,264	0,169	0,314	0,264	0,185
H_2O	1,964	1,964	1,984	2,023	1,983

Таблица 6

**Минералогический состав отложений, образующихся
при производстве удобрения марки 10-20-20:(В, Zn)**

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %					
	Слой № 1–5	Слой № 1	Слой № 2	Слой № 3	Слой № 4	Слой № 5
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ – гидрофосфат аммония	44,01	46,49	17,24	45,89	48,88	38,99
K_2SO_4 – сульфат калия	24,45	14,03	57,54	12,42	18,17	32,32
$\text{NH}_4\text{FePO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – водный фосфат аммония железа	19,67	21,60	16,75	29,07	17,09	12,96
NH_4Cl – хлорид аммония	1,36	6,17	2,15	1,46	3,14	5,56
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – дигидрат сульфата кальция	8,53	9,75	4,36	9,18	10,60	8,19

Заключение. В результате выполнения научно-исследовательской работы установлен и уточнен химический, фазовый, минералогический состав продукции ОАО «Гомельский химический завод», выпускаемой цехом двойного суперфосфата, и отложений, образующихся в трубчатых реакторах. Подтверждено протекание процессов обменного разложения между отдельными компонентами системы, приводящих к образованию ряда новых соединений, двойных солей, а также доказано предположение, что данные химического состава удобрений не позволяют в полной мере охарактеризовать их качество, агрохимическую эффективность и прогнозировать характер перехода питательных элементов в почвенные растворы и растения.

Установлено, что состав отложений, образующихся в трубчатом реакторе, независимо от вида используемых исходных компонентов при выпуске продукции имеет существенные отличия. Это обусловлено различными нормами расхода по компонентам, в результате чего образуются разнообразные по составу водно-солевые системы, из которых на стадии нейтрализации в условиях повышенных температур протекает кристаллизация на внутренних частях реакторов ряда соединения. Кристаллизация происходит при пересыщении системы по тому или иному компоненту, что в первую очередь обусловлено растворимостью этих компонентов в многокомпонентной системе, имеющей достаточно сложный состав, при производстве минеральных удобрений.

Поскольку расходные нормы по сырью определяются требуемыми марками удобрений и не могут быть изменены, образование солевых отложений в трубчатых реакторах в процессе интенсивного испарения воды за счет теплоты экзотермических реакций нейтрализации минеральных кислот неизбежно. В то же время для минимизации образования отложений на поверхности трубчатого реактора и трубопроводов предлагаются следующие варианты решения. Как показал

теоретический анализ характера движения жидкости в трубчатом реакторе, скорости в сечении распределяются по параболе: у стенок трубы скорости равны нулю и, плавно увеличиваясь, достигают максимума на оси потока. При этом одна и та же стенка в зависимости от величины числа Рейнольдса может вести себя по-разному: в одном случае как гладкая, а в другом – как шероховатая. В зависимости от шероховатости она может выступать центром кристаллизации. Чем выше шероховатость, тем более вероятно, что на поверхности будет идти кристаллизация солей из водно-солевой системы. Поэтому обработка (шлифовка) внутренней поверхности или использование фторопластовых вкладышей обеспечат снижение шероховатости поверхности и уменьшение количества центров кристаллообразования. Поскольку большинство водорастворимых соединений, входящих в состав комплексных удобрений, имеет положительный градиент по растворимости от температуры, то необходим контроль изменения температуры по длине трубчатого реактора для исключения ее снижения ниже оптимальных значений. Пересыщение системы может быть снижено путем дополнительного введения воды, что, однако, может привести к возрастанию нагрузки на барабанный гранулятор-сушилку и снижению производительности. При введении всего количества хлористого калия в составе жидкой фазы, подаваемой в трубчатый реактор, на стадии нейтрализации отмечается более интенсивное пересыщение присутствующими в ней солями, что в свою очередь приводит к ускоренному образованию отложений. Для уменьшения этого фактора предлагается дробное внесение хлорида калия: через жидкую фазу вводится от $\frac{1}{3}$ до $\frac{2}{3}$ хлорида калия, остальное количество – через ретурный тракт.

Работа выполнялась в рамках ГБ 24-107 «Разработка метода получения ортофосфорной кислоты технической квалификации на основе комплексной очистки экстракционной фосфорной кислоты», ГР № 20240816.

Список литературы

1. Dormeshkin O. B. Interactions between components of complex fertilizers. Lambert, 2019. 58 p.
2. Винник М. М. Методы анализа фосфатного сырья, фосфорных и комплексных удобрений, кормо-
вых фосфатов. М.: Химия, 1975. 218 с.

3. Удобрения минеральные. Методы определения содержания фосфора: ГОСТ 20851.2–75. М.: Гос. ком. СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1983. 39 с.
4. Удобрения минеральные. Метод определения массовой доли аммонийного азота в сложных удобрениях: ГОСТ 30181.8–94. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1996. 6 с.
5. Удобрения минеральные. Метод определения массовой доли азота в удобрениях, содержащих азот в нитратной форме: ГОСТ 30181.3–94. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1996. 6 с.
6. Удобрения минеральные. Метод определения суммарной массовой доли азота, содержащегося в сложных удобрениях и селитрах в аммонийной и нитратной формах: ГОСТ 30181.4–94. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1996. 9 с.
7. Удобрения минеральные. Метод определения массовой доли амидного азота в сложных удобрениях: ГОСТ 30181.5–94. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1996. 5 с.
8. Удобрения минеральные. Методы определения содержания калия: ГОСТ 20851.3–75. М.: Гос. ком. СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1983. 22 с.
9. Шарло Г. Методы аналитической химии. Качественный анализ неорганических соединений. М.: Химия, 1965. 976 с.
10. Реактивы и особо чистые вещества. Комплексонометрический метод определения содержания основного вещества: ГОСТ 10398–76. М.: Гос. ком. стандартов Совета министров СССР: Изд-во стандартов, 1976. 18 с.
11. JCPDS International Centre for Diffraction Data 2003. URL: <https://id.loc.gov/authorities/names/no2003096804.html> (date of access: 15.08.2023).
12. Физико-химические основы и технологии получения новых видов комплексных удобрений: монография / О. Б. Дормешкин [и др.]. Минск: БГТУ, 2024. 347 с.
13. Новые виды фосфорсодержащих комплексных удобрений и тукосмесей. Технологии получения и агрохимическая эффективность: монография / К. Т. Жантасов [и др.]; науч. ред.: О. Б. Дормешкин, К. Т. Жантасов. Минск: БГТУ, 2020. 307 с.
14. Получение комплексного NPK удобрения / Д. И. Андросов [и др.]. Казань: КГТУ, 2001. 142 с.
15. Физико-химические свойства карбамидсодержащих азотно-фосфорно-калийных удобрений, кондиционированных солями магния / К. Г. Горбовский [и др.] // Химическая технология. 2013. № 2. С. 70–74.

References

1. Dormeshkin O. B. Interactions between components of complex fertilizers. Lambert, 2019. 58 p.
2. Vinnik M. M. *Metody analiza fosfatnogo syr'ya, fosfornykh i kompleksnykh udobreniy, kormovykh fosfatov* [Methods of analysis of phosphate raw materials, phosphate and complex fertilizers, feed phosphates]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 218 p. (In Russian).
3. GOST 20851.2–75. Mineral fertilizers. Methods for determination of phosphorus content. Moscow, Gos. kom. SSSR po standartam Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 1983. 39 p. (In Russian).
4. GOST 30181.8–94. Mineral fertilizers. Method for determination of mass fraction of ammonium nitrogen in compound fertilizers. Minsk, Mezghos. sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belarus. gos. in-t standartizatsii i sertifikatsii Publ., 1996. 6 p. (In Russian).
5. GOST 30181.3–94. Mineral fertilizers. Method for determination of mass fraction of nitrogen in fertilizers containing nitrogen in nitrate form. Minsk, Mezghos. sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belarus. gos. in-t standartizatsii i sertifikatsii Publ., 1996. 6 p. (In Russian).
6. GOST 30181.4–94. Mineral fertilizers. Method for determination of total mass fraction of nitrogen contained in compound fertilizers and nitrate in ammonium and nitrate forms. Minsk, Mezghos. sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belarus. gos. in-t standartizatsii i sertifikatsii Publ., 1996. 9 p. (In Russian).
7. GOST 30181.5–94. Mineral fertilizers. Method for determination of mass fraction of amide nitrogen in compound fertilizers. Minsk, Mezghos. sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belarus. gos. in-t standartizatsii i sertifikatsii Publ., 1996. 5 p. (In Russian).
8. GOST 20851.3–75. Mineral fertilizers. Methods of determination of potassium content. Moscow, Gos. kom. SSSR po standartam Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 1983. 22 p. (In Russian).
9. Sharlo G. *Metody analiticheskoy khimii. Kachestvennyy analiz neorganicheskikh soedineniy* [Methods of analytical chemistry. Qualitative analysis of inorganic compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 1965. 976 p. (In Russian).

10. GOST 10398–76. Reagents and extra pure substances. Complexometric method for determination of the content of the main substance. Moscow, Gos. kom. standartov Soveta ministrov SSSR Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 1976. 18 p. (In Russian).

11. JCPDS International Centre for Diffraction Data 2003. Available at: <https://id.loc.gov/authorities/names/no2003096804.html> (accessed 15.08.2023).

12. Dormeshkin O. B., Hauryliuk A. N., Chernyakov D. V., Mokhart M. S. *Fiziko-khimicheskiye osnovy i tekhnologii polucheniya novykh vidov kompleksnykh udobreniy* [Physico-chemical bases and technologies for obtaining new types of complex fertilizers]. Minsk, BGTU Publ., 2024. 347 p. (In Russian).

13. Zhantasov K. T., Dormeshkin O. B., Moldabekov Sh. M., Minakovskiy A. F., Ajbalaeva K. D., Zhantassova D. M., Omarov B. T. *Novyye vidy fosforsoderzhashchikh kompleksnykh udobreniy i tukosmesey. Tekhnologii polucheniya i agrokhimicheskaya effektivnost'* [New types of phosphorus-containing complex fertilizers and tucosmixtures. Technologies for obtaining]. Minsk, BGTU Publ., 2020. 307 p. (In Russian).

14. Androsov D. I., Beskov V. S., Pochitalkina I. A., Yankov A. V. *Polucheniye kompleksnogo NPK udobreniya* [Obtaining complex NPK fertilizer]. Kazan, KGTU Publ., 2001. 142 p. (In Russian).

15. Gorbovskiy K. G., Norov A. M., Malyavin A. S., Mikhaylichenko A. I. Physicochemical properties of urea-containing nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers conditioned with magnesium salts. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2013, no. 2, pp. 70–74 (In Russian).

Информация об авторах

Дормешкин Олег Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dormeshkin@yandex.ru

Гаврилюк Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gavriluk_andrew@mail.ru

Мохорт Марк Сергеевич – аспирант кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: markmohort@gmail.com

Бышик Александр Александрович – магистрант кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: fxguru29@gmail.com

Information about the authors

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

Hauryliuk Andrey Nikolayevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gavriluk_andrew@mail.ru

Mokhart Mark Sergeevich – PhD student, the Department of Inorganic Materials Technology and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: markmohort@gmail.com

Byshyk Aleksandr Aleksandrovich – Master's degree student, the Department of Inorganic Materials Technology and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fxguru29@gmail.com

Поступила 05.11.2024