Поступила в редакцию *25.12.2021*

УДК 66.047.7 : 661.152.5 DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-66-77

Разработка процессов и технологий получения порошков и гранул микроэлементов методами распылительной сушки и окатывания на тарельчатом грануляторе

В. И. Назаров[*,], Д. А. Макаренков[*,***,1], А. П. Попов[*], Г. Р. Афлятунова[*], Н. Ю. Трубачев[*]**

** НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА, Москва, Россия*
*** МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия*
**** Московский политехнический университет, Москва, Россия*

Аннотация

Приведены экспериментальные данные по получению порошков из растворов микроэлементов в хелатной форме на распылительной сушилке и даны режимные параметры ее работы. Рассмотрена конструкция распылительной сушилки. Определены технологические параметры процесса сушки при различных сочетаниях расходов жидкости и сушильного агента. Получены результаты исследования структуры и гранулометрического состава порошков и определены условия сохраняемости микроэлементов в комплексной форме. Представлен механизм перехода капли раствора при сушке в полую сферу. Рассмотрены особенности процесса получения гранулированных микроэлементов в хелатной форме на минеральных носителях. Объектами исследования выбраны: водный раствор хелата меди, минеральные носители (известняк, гидроксид магния и фосфоритная мука). Приведена конструкция тарельчатого гранулятора.

Установлено, что гранулирование на тарельчатом грануляторе лучше проводить в динамическом режиме. Полученные гранулы обладают высокой прочностью, не слеживаются и сохраняют комплекс хелатов при длительном хранении.

Ключевые слова

Распылительная сушка, тарельчатый гранулятор, микроэлементы, хелаты, порошки, гранулы, минеральный носитель.

Введение

В агрокомплексе для повышения урожайности сельскохозяйственных культур, усвояемости элементов питания и улучшения плодородия почв наряду с минеральными и органическими удобрениями применяют микроэлементы в хелатной форме (МХФ). Практическое значение имеют микроэлементы, которых обычно не хватает в почве. При этом необходимо соблюдать оптимальные соотношения между макро- и микроэлементами. Следует учитывать вопросы качества улучшения питания растений, повышения их устойчивости к неблагоприятным факторам, а также

[1] *Для переписки*
Email: makarenkovd@mail.ru

фактор ввода МХФ в жидком, порошкообразном или гранулированном виде.

Рассмотрим основные свойства некоторых микроэлементов.

Железо (Fe) играет ключевую роль в синтезе хлорофилла. Оно участвует в фиксации атмосферного азота, в обмене углеводородов, белков, ауксинов, серы и восстанавливает нитриты до аммиака. Недостаток железа приводит к пожелтению листьев, и растение гибнет.

Медь (Cu) ускоряет образование углеводов, белков, жиров и витамина С, а также повышает интенсивность дыхания растений и фотосинтез. При этом повышается морозо- и засухоустойчивость, усиливается стойкость к заболеваниям и ускоряется образование плодов. Недостаток меди ухудшает опыление растений и приводит к полеганию злаковых культур.

Цинк (Zn) увеличивает содержание сахарозы, крахмала и белков, витамина С, активирует фитогормон АУК, усиливает рост корневой системы, повышает водоудерживающую способность, морозо- и засухоустойчивость. Недостаток цинка негативно влияет на образовании семян.

Марганец (Mn) активирует процесс фотосинтеза, уменьшает содержание нитратов в продукции, повышает содержание витамина С. Недостаток марганца ухудшает процессы обмена веществ, в частности, синтез углеводов и протеинов.

Молибден (Mo) улучшает азотный обмен и синтез белков, уменьшает содержание нитратов. Он необходим в усвоении азота из воздуха и при синтезе нуклеиновых кислот. Ввод Mo увеличивает содержание хлорофилла, повышает интенсивность фотосинтеза и приводит к росту содержания углеводов, каротина, аскорбиновой кислоты и белка. Недостаток молибдена снижает устойчивость растений к различным заболеваниям.

Кобальт (Co) усиливает фиксацию азота, увеличивает содержание хлорофилла и каротиноидов и входит в состав витамина B_{12}. Участвует в азотном обмене, синтезе белка и нуклеиновых кислот. Он увеличивает содержание воды, особенно в засуху.

Бор (B) в боратной форме улучшает углеводный и белковый обмен, опыление и оплодотворение цветков, предотвращает появление гнили, а также усиливает отток продуктов фотосинтеза в клубни, корнеплоды и луковицы. Недостаток бора ухудшает процессы деления клеток.

Современные технологии позволили использовать биологически активные микроэлементы посредством комплексов, которые включают металлы в хелатной форме. Они имеют большую растворимость, в отличие от солей неорганических кислот. Для хелатов также нет ограничений по кислотности почв (pH).

В настоящее время наиболее перспективными для создания и применения хелатов, с биологической точки зрения, являются этилендиаминтетрауксусная (ЭДТА), диэтилентриаминпентауксусная (ДТПА), дигидроксибутилендиаминтетрауксусная (ДБТА), этилендиаминдиянтарная (ЭДДЯ), оксиэтилидендифосфоновая (ОЭДФ) и нитрилтриметиленфосфоновая (НТФ) кислоты [1].

В НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА разработана технология получения хелатированных микроудобрений в виде растворов, содержащих один или несколько микроэлементов [2, 3]. Концентрация микроэлементов в этих растворах составляет (2÷4) %. Для перевода микроэлементов в хелатной форме в порошок был использован метод распылительной сушки (РС). Достоинством порошков с микроэлементами в хелатной форме (ПМХФ) является возможность их дозированного использования и применения в качестве

отдельных добавок к минеральным удобрениям для повышения их эффективности в закрытых и открытых грунтах.

Научно-инжиниринговым центром ИРЕА был разработан способ получения гранулированных МХФ. Для перевода МХФ в гранулы использовали метод окатывания на тарельчатом грануляторе на минеральных носителях (МН) [4]. При гранулировании использовали водный раствор хелата меди и минеральные носители (известняк, гидроксид магния, фосфоритная мука).

Материалы и методы исследования. Для перевода раствора в порошки лучше всего использовать распылительную сушилку. Сушильные распылительные установки, как правило, используются для обезвоживания растворов веществ в химической промышленности и других отраслях при производстве сухих дисперсных материалов [5, 6]. При распылительной сушке получаемый высушенный продукт имеет высокое качество, так как при работе исключен его перегрев и не требуется дополнительного измельчения порошка. При этом начальная влажность растворов в среднем равна (90–95) %, а конечная влажность порошков составляет (3–6)%, что дает возможность исключить из технологии стадии предварительного выпаривания раствора [7].

Исследование процесса получения порошкообразных микроэлементов на хелатной основе проводилось на лабораторной распылительной сушилке (рисунок 1) в следующем диапазоне режимных параметров (таблица 1).

Подписи на рисунке 1 следующие: 1 — воздуховод отработанного воздуха после циклона; 2 — форсунка; 3 — корпус; 4 — перистальтический насос; 5 — сенсорный экран; 6 — пусковая кнопка; 7 — манометры; 8 — компрессор; 9 — колеса с фиксаторами; 10 — основной сборник продукта; 11 — фиксатор сборника; 12 — циклон; 13 — вспомогательный сборник; 14 — фиксатор циклона; 15 — сушильная камера; 16 — вентилятор; 17 — нагреватель воздуха; 18 — фиксатор сушильной камеры.

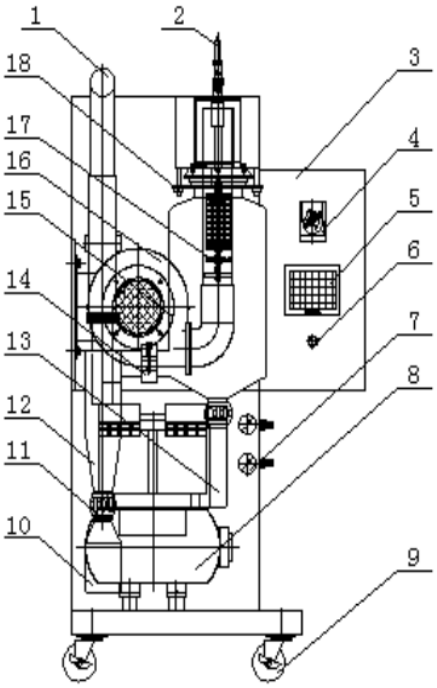


Рисунок 1 — Схема лабораторной распылительной сушилки YC-015 для получения порошков микроэлементов в хелатной форме

Таблица 1 — Режимные параметры работы лабораторной распылительной сушилки

№ п/п	Параметры процесса	Значение
1	Температура на входе в сушильную камеру $t_{вх}$, °С	200–240
2	Температура на выходе из сушильной камеры $t_{вых}$, °С	115–140
3	Производительность насоса Gрас, л/ч	0,5–1,5
4	Давление для подачи жидкости Рж, атм	0,2–0,4
5	Производительность вентилятора Gв, м3/ч	20–35
6	Влагосодержание порошкообразного продукта Wп, %	2,5–4,5
7	Производительность по исходному раствору Gи.р., л/ч	0,2–1,5

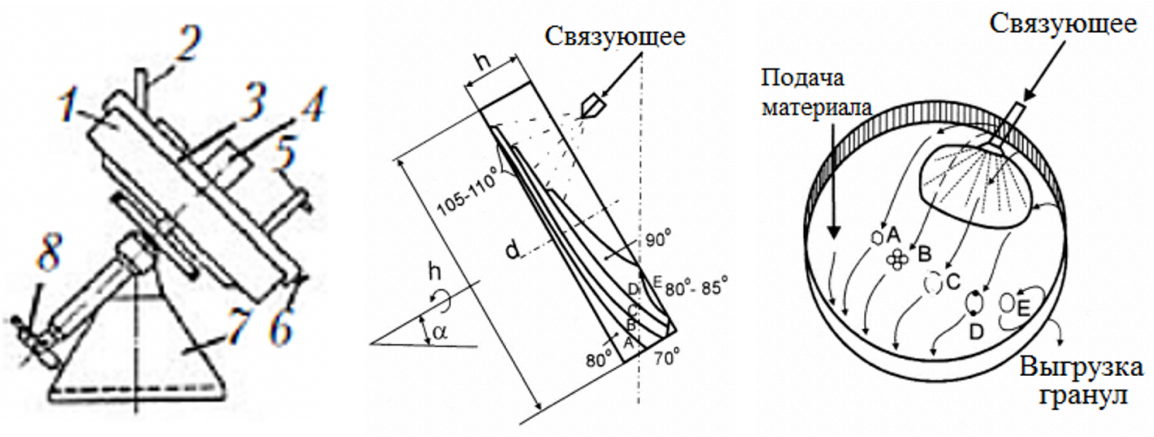
Полученные порошки исследовались на гранулометрический состав (по микрофотографиям порошков) и на содержание микроэлементов в хелатной (комплексной) форме с использованием метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ГОСТ EN 15962-2014).

Перспективным методом является получение комплекса макро- и микроэлементов вместе с гранулированными фосфорными минеральными удобрениями. В РФ производятся гранулированные сложные фосфорные минеральные удобрения типа РК, NPK, NPKS, а также органоминеральные (ОМУ). Для их получения широко используются методы окатывания в барабанных грануляторах-сушилках (БГС) и на тарельчатых грануляторах [8]. Для повышения качества минеральных удобрений в агрохимии дополнительно используются микроэлементы в хелатной форме [9].

Гранулированные хелатные микроэлементы можно получить методом окатывания на тарельчатом грануляторе. Конструкция гранулятора, способы подачи материала и связующего на днище тарели и траектория движения материала по тарели в зоне подачи связующего приведены на рисунке 2. В состав гранулятора входят вращающаяся тарель, станина и привод. Угол наклона тарели обеспечивается с помощью регулятора. Место ввода сухой шихты и связующего определяется требованиями к гранулометрическому составу. Для получения крупных гранул материал загружают в нижнюю часть тарели, а орошение проводят в верхней части поднимающегося слоя.

Гранулы из порошкообразных материалов образуются за счёт взаимодействия частиц под действием диспергированных капель связующего. Происходит агломерация мелкодисперсных частиц за счёт адгезионных сил взаимодействия между частицами и связующим. При заданном времени пребывания материала на тарели происходит рост гранул.

Гранулирование МН вместе с микроэлементами (МЭ) осуществляли на тарельчатом грануляторе в динамическом режиме при превышении критической частоты вращения тарели и с использованием отбойных элементов [4]. В результате увеличилась используемая поверхность гранулятора до (60–70) % и повысилась интенсивность процесса гранулирования.



а) б) в)

Рисунок 2 — Тарельчатый гранулятор (а) и способы подачи материала и связующего на днище тарели (б): 1 — тарель; 2 — патрубок для порошка; 3 — кожух; 4 — патрубок; 5 — патрубок для ввода связующего; 6 — патрубок для подачи гранул на сушку; 7 — станина; 8 — устройство для регулирования угла наклона тарели

При размере исходных частиц МН 100–200 мкм и частоте вращения тарели n = 40 об/мин с углом наклона тарели α = 45 град получены плотно-прочные гранулы.

При этом массовое соотношение компонентов составило $G_{мн}$:$G_{мэ}$:$G_{Б2}$ = 10:1:1.

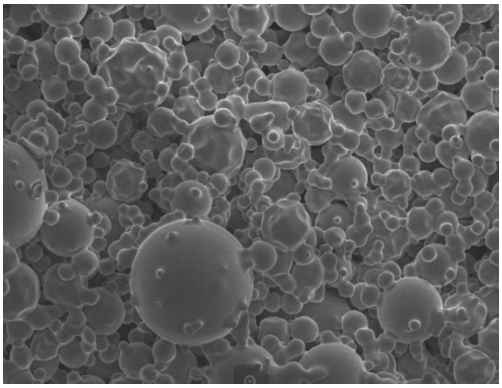
Содержание микроэлемента в хелатной форме и, в частности, содержание хелата меди определяли в растворе и в гранулах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Также определялась влажность гранул после сушки и гранулометрический состав конечного продукта методом ситового анализа.

Результаты и их обсуждение

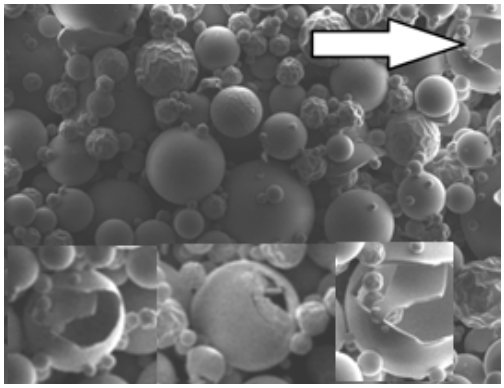
При сушке растворов с микроэлементами в хелатной форме получены следующие результаты.

Установлено, что при температуре сушильного агента в $t_{вх}$ = 200 °C и соотношения $G_{и.р.}^{Cu}$:$G_{в}$ = 1:150, давление воздуха на форсунке $P_{возд}$ = 5 бар, происходит полный переход МХФ из растворов в порошок.

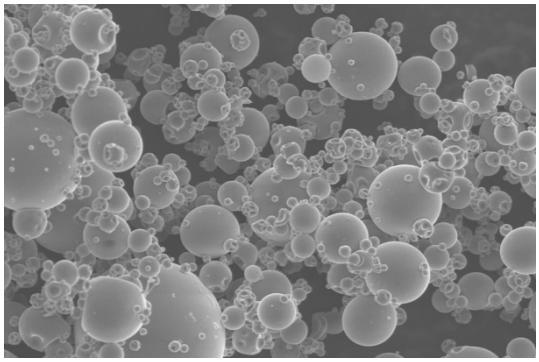
На рисунке 4 представлены микрофотографии полученных порошков. Большая часть порошков имеет правильную шарообразную форму, не слипается (кроме рисунка 4а) и не образует агломератов. Было выявлено, что при сушке некоторых растворов внутри частиц могут образовываться «усадочные полости» (рисунок 4б) вследствие мгновенной кристаллизации оболочки, образовавшейся при распыливании сферической капли.



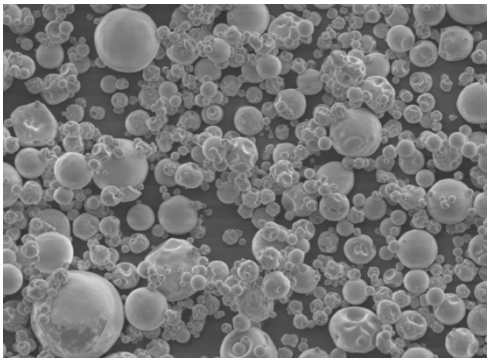
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 — Микрофотографии порошков микроэлементов в хелатной форме, полученных на лабораторной распылительной сушилке:
а) «Хелат Zn» на ЭДТА; б) «Хелат Fe (III)» на ДТПА; в) «Хелат Zn» на ОЭДФ;
г) «Хелатон комби Zn+Cu» на ОЭДФ

Используя микроскопический анализ на основе микрофотографий при увеличении 300–1000 раз [10], был определён гранулометрический состав полученных порошков (рисунок 5). Можно отметить, что порошок, получаемый при сушке из раствора «Хелат Fe (III)» на ДТПА является более крупным по размерам, чем другие ($d_{экв}$ = 5–12 мкм) по сравнению с другими растворами (кривая 3). Это может быть объяснено более высокой производительностью и крупностью распыла жидкости на форсунке при недостаточно высокой температуре сушильного агента.

Предлагаемый способ получения порошков микроэлементов в хелатной форме из водных растворов является хорошо регулируемым процессом РС при различных сочетаниях расхода сушильного агента, расхода распыливающего агента, жидкости и дисперсности распыла.

Были определены технологические параметры процесса сушки порошков с остаточной влажностью до 4,5% и эквивалентным диаметром порошков $d_{экв}$ = 3–4 мкм. При этом был получен высокий выход товарного продукта стабильного состава, не содержащего примеси. Содержание микроэлементов в комплексной форме в порошках составляет в среднем 99%.

Исследование процесса гранулирования проводили на лабораторном тарельчатом грануляторе при его работе в динамическом режиме.

Количество диспергированной жидкой фазы составило 20% от массы загрузки МН при концентрации хелатов меди и твёрдой фазы Б2 соответственно 3,5 и 30%. Микрофотографии гранул при увеличении от 35 до 3000 раз представлены на рисунке 6.

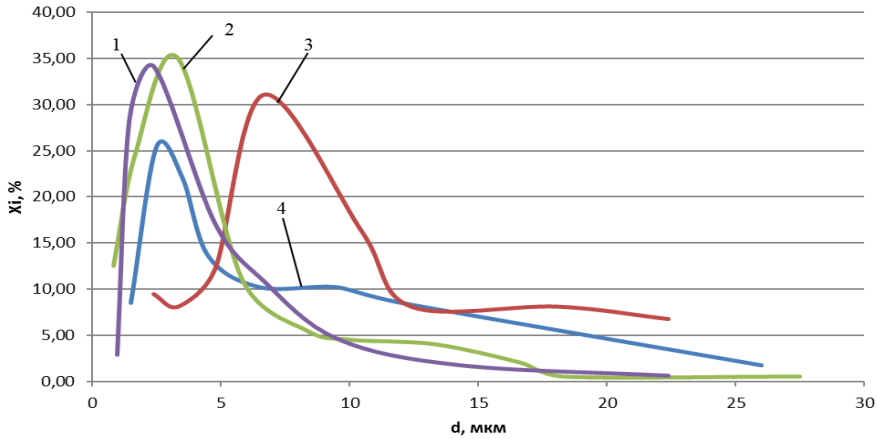
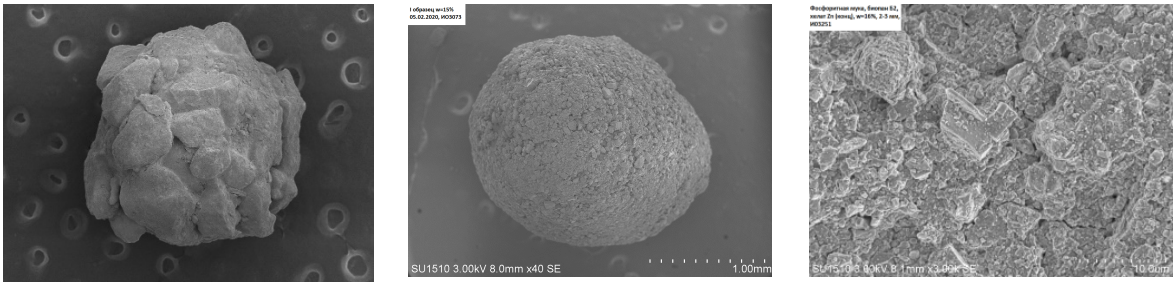


Рисунок 5 — Распределение частиц порошков микроэлементов в хелатной форме по размерам, полученных на лабораторной распылительной сушилке: 1 — Хелатон «Комби» Zn+Cu на ОЭДФ; 2 — Хелат Zn на ОЭДФ; 3 — Хелат Fe (III) на ДТПА; 4 — Хелат Zn на ЭДТА



а) б) в)

Рисунок 6 — Микрофотографии образцов гранул и их поверхности, d=2-3 мм: а) гидроксид магния (брусит); б) известняк; в) фосфоритная мука

Сушку продукта проводили в сушильном шкафу при температуре 105 °C, прочность гранул определяли с помощью измерителя YD-II, а содержание меди в гранулах — методом АЭС-ИСП спектрометрии. Результаты представлены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что наиболее прочными получаются гранулы из фосфоритной муки при повышенном содержании меди, по сравнению с другими носителями. Это объясняется высокой смачиваемостью частиц фосфоритной муки при окатывании. Результаты анализа грансостава показали, что кривые гранулометрического состава описываются нормальным распределением (рисунок 7).

Результаты исследований показали возможность гранулирования микроэлемента в хелатной форме на минеральных носителях различных типов с высокими прочностными характеристиками и с требуемым содержанием микроэлементов в хелатной форме.

Таблица 2 — Массовые соотношения используемых компонентов и результаты измерения характеристик получаемых гранул

Минеральный носитель, г	Массовое соотношение компонентов МН:МЭ:Б2	Содержание меди в гранулированном продукте, % масс.	Прочность гранул d = (2-3) мм, Н/гранулу	Основная фракция гранулированного продукта
Известняк	500:50:50	0,25	20,5	(1–4) мм
Гидроксид магния	400:50:50	0,33	25,0	(1–3) мм
Фосфоритная мука	500:50:50	0,60	56,9	(3–4) мм

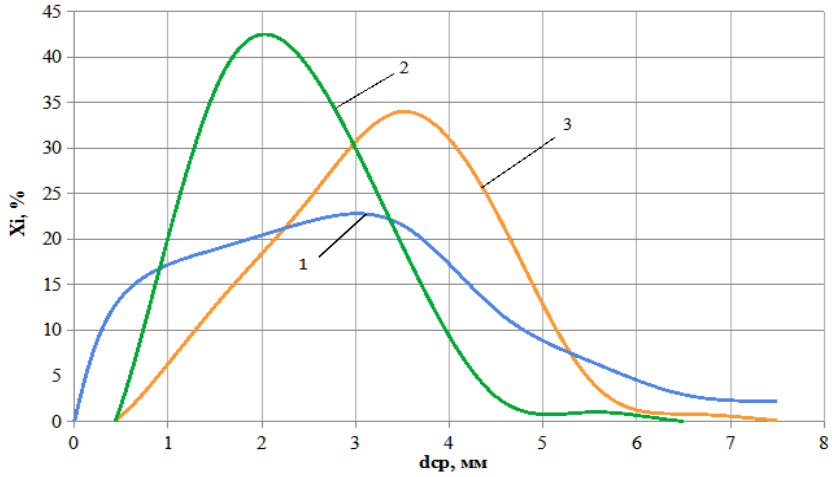


Рисунок 7 — Дифференциальные кривые распределения состава полученных гранул: 1 — на основе известняка; 2 — на основе гидроксида магния; 3 — на основе фосфоритной муки

Заключение

1) Разработанный способ получения порошков микроэлементов в хелатной форме из водных растворов на распылительной сушилке является хорошо регулируемым процессом при различных сочетаниях расходов сушильного агента, распыливающего агента и жидкости.

2) Были определены технологические параметры процесса сушки порошков с остаточной влажностью до 4,5% и эквивалентным диаметром $d_{экв}$ = (3–4) мкм.

3) Был получен высокий выход товарного продукта стабильного состава и не содержащего примеси. Содержание микроэлементов в комплексной форме в порошках составляет в среднем 99% и не падало за время хранения.

4) Предложен способ получения гранул МХФ окатыванием на тарельчатом грануляторе с использованием минерального носителя.

5) Показано, что гранулирование окатыванием лучше проводить в динамическом режиме.

6) Полученные гранулы обладают высокой прочностью, не слеживаются и сохраняют комплексы хелатов при длительном хранении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Булыгин С. Ю., Демишев Л. Ф., Доронин В. А., Заришняк А. С. и др. Микроэлементы в сельском хозяйстве. Д.: Січ, 2007. 100 с.

[2]. Цирульникова Н. В., Болт Я. В., Дерновая Е. С., Фетисова Т. С. Получение новых синтонов для создания полифункциональных комплексонов. *Журнал общей химии*, 2016, Т. 86, № 3, с. 546–548.

[3]. Назаров В. И., Убаськина Ю. А., Макаренков Д. А., Доронин А. А. Специальные комплексные решения НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА для агропроизводства: задачи и возможности малотоннажной химии. *Всемирный конгресс производителей минеральных удобрений и пестицидов, сборник докладов.* 2018. С. 20–21.

[4]. Патент 2515293 Российская Федерация МПК B01J 2/14. Способ гранулирования дисперсных материалов/ Макаренков Д. А., Назаров В. И., Санду Р. А.; заявитель и патентообладатель Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химических реактивов и особо чистых химических веществ» — №2012157313/05; заявл. 27.12.2012; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13 — 8 с.

[5]. Долинский А. А., Малецкая К. Д. Распылительная сушка. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. К., Академпериодика, 2011, Т. 1, 376 с.

[6]. Алексанян И. Ю., Губа О. Е., Максименко Ю. А., Феклунова Ю. С. Распылительная сушилка. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания.* 2015, № 1, С. 61–66.

[7]. Губа О. Е., Максименко Ю. А., Терешонков С. А. Разработка рациональных способов конвективной сушки для жидких продуктов. *Пищевая промышленность.* 2010, № 10, С. 24–25.

[8]. Классен П. В., Гришаев И. Г., Шомин И. П. Гранулирование. М.: Химия, 1991, 240 с.

[9]. Темкина В. Я. Цирульникова Н.В., Ластовский Р. П. Синтез комплексонов. *Журнал всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева*, 1984, Т. 29, № 3, с. 293.

[10]. Назаров В. И., Санду Р. А., Макаренков Д. А., Николайкина Н. Е. Техника и технология совмещенных процессов переработки твердых отходов. Москва, ИНФРА-М, 2020, 456 с.

Назаров Вячеслав Иванович — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3)

Макаренков Дмитрий Анатольевич — д–р техн. наук, доцент, заместитель директора по науке, НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3), доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» Московского политехнического университета (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38).

Попов Александр Павлович — научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3).

Афлятунова Гузель Рауфовна — стажер-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3).

Трубачев Николай Юрьевич — младший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3).

Development of processes and technologies for obtaining powders and granules of microelements by spray drying and pelletizing on a plate granulator

V. I. Nazarov[*,], D. A. Makarenkov[*,***,1], A. P. Popov[*], G. R. Aflyatunova[*], N. Y. Trubachev[*]**

** National Research Center "Kurchatov Institute" — IREA, Moscow, Russia*
*** MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia*
**** Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

Abstract

Experimental data on the powders obtaining from solutions of microelements in chelate form on a spray dryer and the regime parameters of its operation are given. The spray dryer design is considered. The technological parameters of the drying process were determined for various combinations of liquid and drying agent consumption. The research results of the structure and granulometric composition of powders are obtained, and the conditions for the preservation of microelements in a complex form are determined. The transition mechanism of a solution drop into a hollow sphere during drying is presented. The process features of obtaining granular microelements in chelated form on mineral carriers are considered. Aqueous solution of copper chelate, mineral carriers (limestone, magnesium hydroxide and phosphate rock) were chosen as subject of research. The plate granulator design is given. It has been established that it is better to carry out granulation in dynamic mode on a plate granulator. The resulting granules have high strength, do not cake, and retain the complex of chelates during long-term storage.

Keywords

Spray drying, plate granulator, microelements, chelates, powders, granules, mineral carrier

REFERENCES

[1]. Bulygin S. Iu., Demishev L. F., Doronin V. A., Zarishniak A. S. et al. Mikroelementy v sel'skom khoziaistve. [Trace elements in agriculture]. Dnepropetrovsk, Sich Publ., 2007, 100 p. (In Russ.)

[2]. Tsirul'nikova N.V., Bolt Ya.V. Dernovaia E.S., Fetisova T.S. Poluchenie novykh sintonov dlia sozdaniia polifunktsional'nykh kompleksonov [Preparation of new synthons for designing polyfunctional chelating agents]. *Zhurnal obshchei khimii* [Russian Journal of General Chemistry], 2016, V. 86, no. 3, pp. 546–548 (In Russ.)

[3]. Nazarov V. I., Ubas'kina Iu. A., Makarenkov D. A., Doronin A. A. Spetsial'nye kompleksnye resheniia NITs «Kurchatovskii institut» — IREA dlia agroproizvodstva: zadachi i vozmozhnosti malotonnazhnoi

[1] *Corresponding author*
Email: makarenkovd@mail.ru

khimii [Special complex solutions of the National Research Center "Kurchatov Institute" — IREA for agricultural production: tasks and possibilities of low-tonnage chemistry]. *Vsemirnyi kongress proizvoditelei mineral'nykh udobrenii i pestitsidov, sbornik dokladov* [World Congress of Producers of Mineral Fertilizers and Pesticides, collection of reports], 2018, pp. 20-21. (In Russ.)

[4]. Patent No. 2515293 Russian Federation, MPK B01J 2/14. Sposob granulirovaniia dispersnykh materialov [Method of granulating particulates]/ Makarenkov D. A., Nazarov V. I., Sandu R. A.; applicant and patentee Ministerstvo obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predprijatie "Gosudarstvennyj ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel'skij institut khimicheskikh reaktivov i osobo chistykh khimicheskikh veshchestv"[Federal State Unitary Enterprise Research Institute of Chemical Reactants and Ultrapure Compounds] – №2012157313/05; Date of filing of the application 27.12.2012; date of publication 10.05.2014, *Biulleten'* [Bulletin], No 13 – 8 p. (In Russ.)

[5]. Dolinskii A. A., Maletskaia K. D. Raspylitel'naia sushka. Teplofizicheskie osnovy. Metody intensifikatsii i energosberezheniia [Spray drying. Thermophysical Foundations. Methods of intensification and energy saving]. Kiev, Akademperiodika Publ., 2011. V.1. 376 p. (In Russ.)

[6]. Aleksanian I. Iu., Maksimenko Iu. A., Guba O. E., Feklunova Iu. S. Raspylitel'naia sushilka [Spray dryer]. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvaiushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniia* [Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex-healthy food products], 2015, no.1, pp. 61-66. (In Russ.)

[7]. Guba O. E., Maksimenko Iu. A., Tereshonkov S. A. Razrabotka ratsional'nykh sposobov konvektivnoi sushki dlia zhidkikh produktov [Development of rational ways of convective drying for liquid products]. *Pishchevaia promyshlennost'* [Food industry], 2010, no. 10. pp. 24-25. (In Russ.)

[8]. Klassen P.V., Grishaev I.G., Shomin I.P. Granulirovanie [Granulation]. Moscow, Chemistry Publ., 1991. 240 p. (In Russ.)

[9]. Temkina V. Ya. Tsirul'nikova N. V., Lastovskii R. P. Sintez kompleksonov [Synthesis of complexones]. *Zhurnal vsesoiuznogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva* [Journal of the All-Union Chemical Society named after D.I. Mendeleev], 1984, V. 29, no. 3, pp. 293. (In Russ.)

[10]. Nazarov V. I., Sandu R. A., Makarenkov D. A., Nikolaikina N. E. Tekhnika i tekhnologiia sovmeshchennykh protsessov pererabotki tverdykh otkhodov [Technique and technology of combined solid waste processing processes]. Moskow, INFRA-M Publ., 2020, 456 p. (In Russ.)

Nazarov V. I. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Senior Research Officer, NRC «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation).

Makarenkov D. A. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Deputy Director for Science, NRC «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation), Assoc. Professor, Department «Processes and Apparatus of Chemical Technologies», Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russian Federation).

Popov A. P. — Research Officer, NRC «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation).

Aflyatunova G. R. — Research Assistant, NRC «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation).

Trubachev N. Y. — Research Assistant, NRC «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Разработка процессов и технологий получения порошков и гранул микроэлементов методами распылительной сушки и окатывания на тарельчатом грануляторе / В. И. Назаров, Д. А. Макаренков, А. П. Попов, Г. Р. Афлятунова, Н. Ю. Трубачев // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 1. С. 66 – 77.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-66-77

Please cite this article as:

Nazarov V. I., Makarenkov D. A., Popov A. P., Aflyatunova G. R., Trubachev N. Y., A. P. Popov, G. R. Aflyatunova, N. Y. Trubachev Development of processes and technologies for obtaining powders and granules of microelements by spray drying and pelletizing on a plate granulator. Industrial processes ang Technologies, 2022, vol. 2, no. 1, pp. 66 – 77

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-66-77