

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.2.16

УДК 661.152.3

**А.А. Яковлева, Н.И. Якушева,
О.А. Федотова, А.Г. Старостин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ СТРУВИТА МЕТОДОМ ОКАТЫВАНИЯ

Струвит (магний-аммоний фосфата, МАФ) представляет собой комплексное удобрение, содержащее три питательных элемента: азот, фосфор и магний.

В лабораторных условиях получен струвит в виде мелкодисперсного порошка белого цвета с размером частиц от 1 до 15 мкм. Для более эффективного использования струвита в качестве удобрения необходимо осуществить его гранулирование, поскольку гранулированные удобрения обладают улучшенными агротехническими свойствами, сохраняют качество при хранении и не слеживаются.

В лабораторной и промышленной практике применяют различные методы и приемы гранулирования в зависимости от состава исходного материала и требований, предъявляемых к грануляту. В научной литературе представлены четыре основных метода гранулирования: окатывание, диспергирование жидкости на поверхность гранул, прессование сухих порошков, экструзия. Сравнительный анализ различных способов гранулирования позволил выбрать метод окатывания, так как он имеет следующие преимущества: высокая производительность; простота аппаратного оформления; возможность использования стандартного оборудования; возможность получения продукта в виде сферических гранул.

В результате анализа научной и патентной литературы выделены основные виды связующих для гранулирования комплексных удобрений: силикат натрия, лигносульфонат, латекс, меласса.

Проведены лабораторные исследования процесса гранулирования струвита методом окатывания. Процесс окатывания струвита проводили в термостатируемом барабанном грануляторе с постоянной скоростью вращения. Изучено влияние вида, расхода связующего и температуры на процесс гранулирования. Определены основные характеристики полученных гранул: выход гранул фракции 1,0–5,0 мм, прочность гранул, средний размер и форма получаемых частиц.

Ключевые слова: *струвит (магний-аммоний фосфата, МАФ); гранулирование; окатывание, связующее, выход и прочность гранул, средний размер и форма получаемых частиц.*

**A.A. Yakovleva, N.I. Yakusheva,
O.A. Fedotova, A.G. Starostin**

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

RESEARCH OF THE PROCESS OF GRANULATION OF STRUCTURE BY THE METHOD OF WRAPPING

Struvite (magnesium ammonium phosphate, MAF) is a complex fertilizer containing three nutrients (nitrogen, phosphorus and magnesium).

In laboratory conditions, struvite was obtained in the form of a fine white powder with a particle size of 1 to 15 microns. For more effective use of struvite as a fertilizer, it is necessary to granulate it, since granular fertilizers have improved agrotechnical properties, maintain quality during storage and are not caked.

In laboratory and industrial practice, various granulation methods and techniques are used, depending on the composition of the starting material and the requirements for granulate. Based on the scientific literature, the following main granulation methods are identified: pelletizing, dispersing liquid onto the surface of granules, pressing dry powders, extrusion. A comparative analysis of various methods of granulation made it possible to choose a method of pelletizing, as it has the following advantages: high productivity; simplicity of hardware design; the ability to use standard equipment; the possibility of obtaining a product in the form of spherical granules.

From the analysis of scientific and patent literature, the main types of binders for granulation of complex fertilizers (sodium silicate, lignosulfonate, latex, molasses) were selected.

Laboratory studies of the granulation of struvite by the pelletizing method were carried out. The struvite pelletizing process was carried out in a thermostatic drum granulator with a constant rotation speed. The influence of the type, binder consumption and temperature on the granulation process was studied. The main characteristics of the obtained granules were determined (yield of granules of a fraction of 1.0-5.0 mm, granule strength, average size and shape of the resulting particles)

Keywords: *struvite (magnesium ammonium phosphate, MAF); granulation; pelletizing, binder, yield and strength of granules, average size and shape of the resulting particles.*

Гранулирование – это совокупность физических и физико-химических процессов, позволяющих обеспечить необходимую структуру, размер и форму обрабатываемого материала [1]. В научной литературе [2] представлены три основных метода гранулирования: окатывание, диспергирование жидкости на поверхность гранул, прессование сухих порошков и экструзия.

1. *Окатывание* – формирование гранул в процессе их агрегации или послыонного роста с последующим уплотнением структуры. Этот процесс обусловлен действием капиллярно-адсорбционных сил сцеп-

ления между частицами и последующим уплотнением структуры, вызванным силами взаимодействия между частицами в плотном динамическом слое, например, в грануляторах барабанного или тарельчатого типов. Окатывание объединяет группу процессов, которые характеризуются перемещением гранулируемого порошка по поверхности аппарата. При этом частицы перекатываются по стенкам аппарата и друг через друга. Непрерывное движение гранулируемого материала приводит как к образованию и росту гранул, так и деструкции наименее прочных из них. При одновременном протекании этих противодействующих процессов образуются и сохраняются прочные и примерно одинаковые гранулы.

2. *Диспергирование жидкости в свободный объем или нейтральную среду* – образование и отвердевание капель жидкости при охлаждении в газе или жидкости. Гранулирование методом диспергирования заключается в разбрызгивании жидкости на капли, приближенно однородные по размеру последующей их кристаллизации при охлаждении в нейтральной среде (воздухе, масле).

3. *Прессование сухих порошков* – получение брикетов, плиток с последующим их дроблением на гранулы требуемого размера.

4. *Формование, или экструзия*, состоит в продавливании пастообразной массы либо смеси порошка с легкоплавким компонентом через перфорированные приспособления с последующей сушкой гранул или их охлаждением.

В результате сравнительного анализа различных способов гранулирования выбран метод окатывания, так как он имеет следующие преимущества [3]:

- высокая производительность;
- простота аппаратного оформления;
- возможность использования стандартного оборудования;
- возможность получения продукта в виде сферических гранул.

В качестве связующего для гранулирования комплексных удобрений в патенте Евразии [4] предлагается использовать силикат натрия. Конкретно для азотно-фосфорно-калийного удобрения 92,28–99,54 мас.% использовать связующего 0,10–0,30 мас.%.

В.Г. Сержантов [5] предлагает в качестве минеральной составляющей использовать мелкодисперсный (не более 70 мкм), обогащенный глауконит концентрацией не менее 90 %; в который добавляют органическую составляющую, в качестве которой используют 10–50%-й водный

раствор минеральных удобрений (азотных и/или калийных и/или фосфорных), с заданной заранее определенной концентрацией, до образования пластической массы влажностью не менее 30 %, при следующем соотношении компонентов: обогащенный глауконит (связующее) – 70–90 мас.%; минеральные удобрения в водном растворе – 10–30 мас.%

В патенте базы данных России [6] для снижения тенденции к слеживаемости, пылеобразованию, увеличения механической прочности в качестве связующего для комплексного удобрения, содержащего азот, калий, магний, предлагают использовать мочевиноформальдегидное вещество.

В патенте [7] предлагается связующее вещество выбирать из группы, состоящей из гексаметафосфата натрия (SHMP), четырехзамещенного пирофосфата натрия (TSPP), четырехзамещенного пирофосфата калия (TKPP), триполифосфата натрия (STPP), силиката калия, силиката натрия, крахмала, декстрана, лигносульфоната, бентонита, монтмориллонита, каолина и их сочетаний.

Поскольку силикат натрия, латекс и лигносульфонат наиболее распространены и доступны, то целесообразно использовать именно их в качестве связующего.

Объектом исследования служил струвит (рис. 1, 2), полученный в лабораторных условиях из модельного раствора сточной воды методом осаждения. Методы получения струвита были рассмотрены ранее авторами [8].



Рис. 1. Фотография струвита

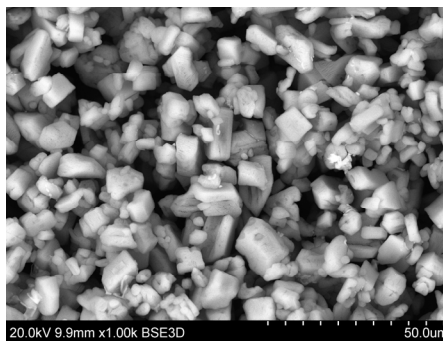


Рис. 2. Микрофотография струвита (увеличение $\times 100$)

Струвит представляет собой мелкодисперсный порошок белого цвета с размером частиц от 1 до 15 мкм.

Процесс гранулирования проводили на лабораторной установке, приведенной на рис. 3.

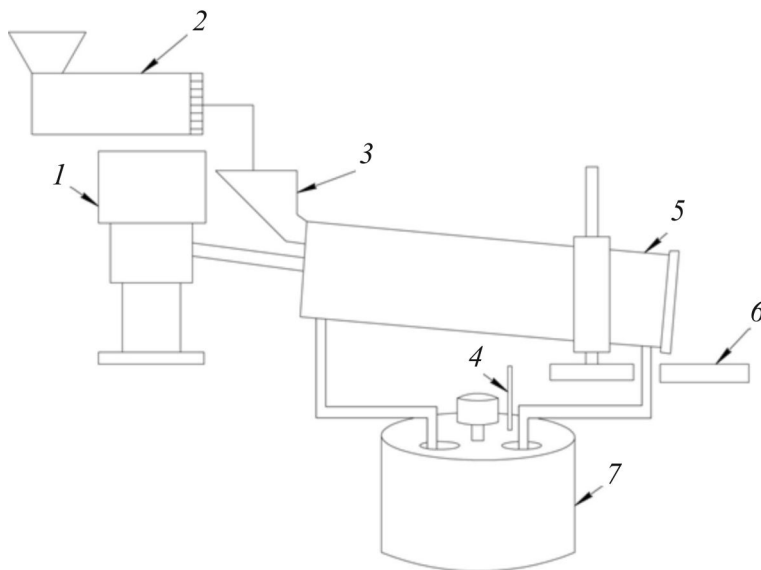


Рис. 3. Схема лабораторной установки для гранулирования: 1 – электрический привод; 2 – устройство формирования исходной шихты; 3 – питатель; 4 – термометр; 5 – барабанный гранулятор; 6 – поддон; 7 – термостат

Струвит смешивали с расчетным количеством связующего и подвергали формованию (продавливание полученной смеси струвита со связующим через сита размером 2,5 мм). После формования частицы продолговатой формы при помощи питателя (3) загружали в барабанный гранулятор (5) с электрическим приводом (1). В процессе вращения гранулятора частицы исходной смеси подвергались окатыванию. Для поддержания заданной температуры процесса гранулирования в рубашку аппарата подавали нагретый в термостате (7) теплоноситель [9]. Исследования проводились при температурах 30, 50 и 80 °С.

Полученные гранулы выгружали на поддон, сушили, после чего при помощи ситового анализа [10] оценивали гранулометрический состав полученного продукта и измеряли среднюю статическую прочность гранул [11].

Первым этапом исследований было изучено влияние температуры на процесс гранулирования. Для проведения исследований в качестве связующего использовали: вода, 10%-й водный раствор силиката

натрия [12]; 10%-й раствор лигносульфоната [13]; 10%-й раствор латекса [14]; 10%-й раствор мелассы [15]. Перед окатыванием проводили предварительное формование гранул. Результаты исследований представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Таблица 1

Влияние температуры на процесс гранулирования

Температура, °С	Расход связующего, %	Гранулометрический состав, %				Выход гранул товарной фракции, %	Средний размер гранул, мм
		–5,0 мм	–5,0 + 2,5 мм	–2,5 + 1,0 мм	–1,0 мм		
<i>10%-й водный раствор силиката натрия</i>							
30	Не происходит образования гранул нужных размеров						
50	35,74	0,00	4,85	52,99	42,16	57,84	1,32
	38,20	0,00	6,53	57,90	35,57	64,43	1,44
	39,13	0,00	6,19	60,14	33,68	66,32	1,45
	40,47	0,00	15,79	68,15	16,06	83,94	1,86
	42,58	0,00	9,47	72,95	17,58	82,42	1,72
80	35,74	0,00	1,88	45,73	52,39	47,61	1,13
	38,20	0,00	4,60	58,34	37,07	62,94	1,38
	39,13	0,00	8,17	63,54	28,29	71,71	1,56
	40,47	55,01	12,52	24,96	7,51	37,48	3,83
<i>10%-й водный раствор лигносульфоната</i>							
30	34,32	0,00	13,58	49,26	37,16	62,84	1,56
	35,64	0,00	35,37	56,55	8,08	91,92	2,36
	36,50	68,71	28,11	2,73	0,45	30,84	4,71
50	34,32	0,00	19,81	45,26	34,93	65,07	1,71
	35,64	0,83	21,87	45,87	31,42	67,75	1,82
	36,50	6,09	58,66	31,26	3,99	89,93	3,09
	37,33	18,23	49,78	28,79	3,20	78,57	3,34
	38,54	Не происходит образования гранул нужных размеров					
80	34,32	0,00	9,19	45,35	45,46	54,54	1,37
	35,64	0,00	15,57	43,08	41,34	58,66	1,54
	36,50	0,00	16,22	53,00	30,78	69,22	1,69
	37,33	82,73	11,99	4,51	0,77	16,50	4,88

По данным, представленным в табл. 1, видно, что при температуре 30 °С со связующим 10%-м водным раствором силиката натрия не происходит образования гранул нужных размеров.

При использовании в качестве связующего 10%-го водного раствора лигносульфоната при температуре гранулирования 30 °С выход гранул достигает максимума 91,92 % при расходе связующего 35,64 %. Однако полученный продукт сложно назвать гранулой, так как он напоминает агломераты (слипшиеся частицы после формования). Из этого следует, что использование температуры гранулирования 30°С не эффективно.



Рис. 4. Агломераты струвита, полученные при 30 °С (расход связующего 10%-го водного раствора лигносульфоната 35,64 %)

При использовании в качестве связующего 10%-го водного раствора лигносульфоната максимальный выход составляет 89,93 % при расходе связующего 36,50 %.

При использовании температуры 80 °С максимальный выход гранул товарной фракции составляет 71,71 % при использовании в качестве связующего – 10%-ного водного раствора силиката натрия с расходом 39,13 %. При использовании в качестве связующего 10%-го водного раствора лигносульфоната максимальный выход составляет 69,22 % при расходе связующего 36,50 %.

Видно, что при температуре 50 °С выход гранул товарной фракции максимален. Поэтому целесообразно использовать температуру 50 °С. Кроме того, использование повышенной температуры ведет к дополнительным энергозатратам. Также исследования показали, что независимо от температуры процесса и связующего гранулы не обладают прочностью.

Вторым этапом исследований было изучение влияния вида и расхода связующего на процесс гранулирования. В качестве связующего были выбраны: вода, 10%-й раствор силикат натрия, 10%-й раствор лигносульфоната, 10%-й раствор латекса, 10%-й раствор мелассы. Перед окатыванием проводили стадию предварительного формова-

При использовании температуры гранулирования 50 °С выход гранул товарной фракции с увеличением расхода связующего увеличивается. Так, максимальный выход гранул товарной фракции 83,94 % достигается при использовании в качестве связующего 10%-го водного раствора силиката натрия с расходом 42,58 %. При использовании в качестве связующего 10%-го

ния гранул. Процесс гранулирования проводили при оптимальной температуре 50 °С. В табл. 2 представлены результаты гранулирования струвита.

Таблица 2

Влияние связующего на процесс гранулирования

Вид связующего	Расход связующего, %	Гранулометрический состав, %				Выход гранул товарной фракции, %	Средний размер гранул, мм
		+5,0 мм	-5,0 + 2,5 мм	-2,5 + 1,0 мм	-1,0 мм		
Вода	19,35	0,00	2,70	49,42	47,88	52,12	1,21
Na ₂ SiO ₃ *5H ₂ O	24,24	0,00	5,86	50,76	43,38	56,62	1,32
	19,82	0,00	0,74	23,34	75,92	24,08	0,82
	33,08	0,00	3,50	47,35	49,15	50,85	1,21
	35,74	0,00	4,85	52,99	42,16	57,84	1,32
	38,20	0,00	6,53	57,90	35,57	64,43	1,44
	39,13	0,00	6,19	60,14	33,68	66,32	1,45
	40,47	0,00	15,79	68,15	16,06	83,94	1,86
	42,58	0,00	9,47	72,95	17,58	82,42	1,72
Лигно-сульфонат	34,32	0,00	19,81	45,26	34,93	65,07	1,71
	35,64	0,83	21,87	45,87	31,42	67,75	1,82
	36,50	6,09	58,66	31,26	3,99	89,93	3,09
	37,33	18,23	49,78	28,79	3,20	78,57	3,34
Латекс	27,28	0,00	1,34	40,26	58,40	41,60	1,05
	28,86	0,00	1,15	39,39	59,46	40,54	1,03
	30,36	0,00	2,51	48,21	49,29	50,71	1,18
	32,74	0,00	34,46	59,10	6,44	93,56	2,36
	34,09	Не происходит образования гранул нужных размеров					
Меласса	30,07	6,87	18,03	29,94	45,16	47,97	1,79
	31,11	0,00	22,73	42,34	34,93	65,07	1,77
	31,61	0,00	37,73	55,42	6,85	93,15	2,42
	32,60	Не происходит образования гранул нужных размеров					

Из табл. 2 видно, что максимальный выход гранул товарной фракции (93,56 %) достигается при использовании в качестве связующего 10%-го водного раствора латекса с расходом 32,74 %, а при увеличении количества связующего до 34,09 % не происходит образования гранул нужных размеров.

Средней прочностью 5,39 обладают только гранулы струвита, полученные со связующим 10%-м раствором мелассы с расходом

31,61 %, при этом выход гранул составляет 93,15 %. Гранулы струвита, полученные с другими связующими, прочности не имеют.

Таким образом, лучшим связующим является меласса, так как получаем высокий выход гранул струвита 93,15 %, при этом гранулы имеют прочность.

Результаты фотомикроскопического анализа гранул, полученных с использованием 10%-го водного раствора мелассы с расходом 31,61 %, представлены на рис. 5.

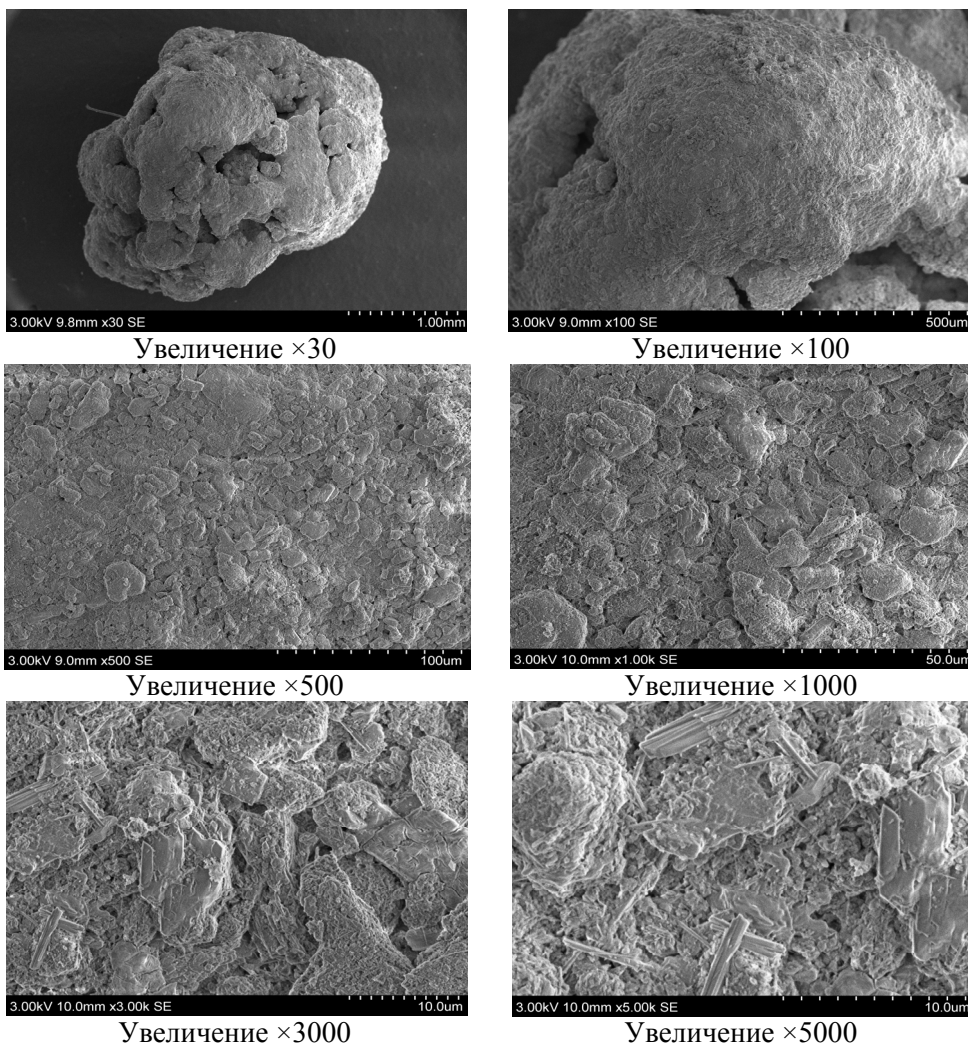


Рис. 5. Микрофотография гранулы струвита, полученной с использованием 10%-го водного раствора мелассы с расходом 31,61 %

На фотографиях видно, что гранула состоит из крупных агломератов, на поверхности которых видна пленка связующего вещества. Агломераты имеют рыхлую поверхность. Также видно, что связующее вещество покрывает гранулу неравномерно.

Таким образом, анализ научной литературы показал, что гранулирование струвита лучше осуществлять методом окатывания, так как он имеет ряд преимуществ.

При исследовании влияния температуры выявлено, что при температуре 50 °С выход гранул товарной фракции максимален. Поэтому целесообразно использовать температуру 50°С. Кроме того, использование повышенной температуры ведет к дополнительным энергозатратам.

Исследования влияния связующего на процесс гранулирования показали, что максимальный выход гранул достигается при использовании в качестве связующего 10%-го водного раствора латекса, но при этом гранулы не обладают прочностью.

Гранулы имеют незначительную прочность только при использовании в качестве связующего 10%-го раствора мелассы. Поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования процесса гранулирования струвита и поиск новых, более эффективных связующих.

Список литературы

1. Вилесов Н.Г. Процессы гранулирования в промышленности. – Киев: Техника, 1972. – 192 с.
2. Классен П.В. Гранулирование. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
3. Классен П.В. Основы техники гранулирования. – М.: Химия, 1982. – 272 с.
4. Пат. 007603В1 Евразия, МПК С05D1. Комплексное удобрение для льна / Богдевич И.М., Катеринин Е.Г., Козлова А.М., Лапа В.В., Пироговская Г.В. – № 200400316, заявл. 12.02.2004; опубл. 29.12.2006.
5. Пат. 2512165С1 Рос. Федерация, МПК С05D1/04. Минерально-органическое комплексное гранулированное удобрение и способ его изготовления / Сержантов В.Г. – № 2012148375/13, заявл. 13.11.2012; опубл. 10.04.2014.
6. Пат. 2332392С2 Рос. Федерация, МПК С05С1/00. Частицы удобрения, имеющие покрытие / Юхани Поукари, Хеикки Херою. – № 2004136286/15, заявл. 20.06.2002; опубл. 27.08.2008.
7. Пат. 2711444С2 Рос. Федерация, МПК С05В7/00. Комплексное удобрение и способ его изготовления / Лоренс Алан Пикок, Ден Фрелих. – № 2015143988, заявл. 14.03.2013; опубл. 17.01.2020.

8. Федотова О.А., Яковлева А.А., Якушева Н.И. Способы получения струвита из сточных вод // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология – 2019. – № 4. – С. 62–72.

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

10. ГОСТ 215.1–82. Удобрения минеральные. Метод определения гранулометрического состава. – Введ. 1983–01. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 3 с.

11. ГОСТ 21560.2–82. Удобрения минеральные. Метод определения статической прочности гранул. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 4 с.

12. Сборник технических условий на клеящие материалы. – Л.: Химия, 1975. – 124 с.

13. Богомоллов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков: учеб. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 360 с.

14. Гармонова И.В. Синтетический каучук. – Л.: Химия, 1976. – 586 с.

15. Касьянова О.В. Переработка отходов природопользования. – Екатеринбург: Издательство УрГУПС, 2002. – 463 с.

References

1. Vilesov N.G. Protsessy granulirovaniia v promyshlennosti [Industrial granulation processes]. Kiev, Tekhnika, 1972, 192 p.

2. Klassen, P.V. Granulirovanie [Granulation]. Moscow, Khimiia, 1991, 240 p.

3. Klassen, P.V. Osnovy tekhniki granulirovaniia [Granulation Technology Basics]. Moscow, Khimiia, 1982, 272p.

4. Bogdevich I.M., Katerinin E.G., Kozlova A.M., Lapa V.V., PirogovskaiaG.V. Kompleksnoe udobrenie dlia l'na [Complex fertilizer for flax]. Patent Evraziia no. 007603B1, MPK C05D1; zaiavl. 12.02.2004; № 200400316, opubl. 29.12.2006.

5. Serzhantov V.G. Mineral'no-organicheskoe kompleksnoe granulirovanoe udobrenie i sposob ego izgotovleniia [Mineral-organic complex granular fertilizer and method for its manufacture]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2512165C1, MPK C05D1/04; zaiavl. 13.11.2012; № 2012148375/13, opubl. 10.04.2014.

6. IukhaniPoukari, KheikkkiKheroiu. Chastitsy udobreniia, imeiushchie pokrytie[Fertilizer particles coated]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2332392C2, MPK C05C1/00; 20.06.2002; № 2004136286/15, opubl. 27.08.2008.

7. Lorens Alan Pikok, DenFrelikh. Kompleksnoe udobrenie i sposob ego izgotovleniia [Complex fertilizer and method for its manufacture]. Patent

Rossiiskaia Federatsiia no. 2711444C2, МПК C05B7/00; zajavl. 14.03.2013; № 2015143988, opubl. 17.01.2020.

8. Fedotova O.A., Iakovleva A.A., Iakusheva N.I. Sposoby polucheniia struvita iz stochnykh vod [Methods for producing struvite from wastewater]. *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaiia tekhnologiia i biotekhnologiia*, 2019, no. 4, pp. 62-72.

9. Fedotova O.A. Razrabotka tekhnologii polucheniia granulirovannykh NPK – udobrenii metodom okatyvaniia na osnove sul'fata ammoniia i khlorida kaliia, sodnozhazhchego primesi flotoreagentov [Development of a technology for producing granulated NPK fertilizers by the pelletizing method based on ammonium sulfate and potassium chloride, which combines impurities of flotation reagents]. Ph. D. thesis. Perm, 2012, 127 p.

10. GOST 215.1-82. Udobreniia mineral'nye. Metod opredeleniia granulometricheskogo sotava [Mineral fertilizer. Method for determination of particle size sotava]. Vned. 1983-01. Moscow, Gosstandart Rossii, Izdatel'stvo standartov, 1983, IV, 3p.

11. GOST 21560.2-82. Udobreniia mineral'nye. Metod opredeleniia staticheskoi prochnosti granul [Mineral fertilizer. Method for determining the static strength of granules]. Vned. 1983-01-01. Moscow, Gosstandart Rossii, Izdatel'stvo standartov, 1983, IV, 4 p.

12. Sbornik tehniceskikh uslovij na klejashhie materialy [Collection of technical specifications for adhesive materials]. Leningrad, Himija, 1975, 124 p.

13. B.D. Bogomolov, S.A. Sapotnickij, O.M. Sokolov. Pererabotka sul'fatnogo i sul'fitnogo shhjolokov [Sulphate and Sulphite Alkali Processing]. Uchebnik dlja vuzov, Lesnaja promyshlennost', 1989, 360 p.

14. Garmonova I.V. Sinteticheskij kauchuk [Synthetic rubber]. Leningrad, Himija, 1976, 586 p.

15. Kas'janova O.V. Pererabotka othodov prirodopol'zovanija [Recycling]. Izdatel'stvo Ural'skij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2002, 463 p.

Получено 01.05.2020

Об авторах

Яковлева Анастасия Александровна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: anasyak1503@gmail.com).

Якушева Наталья Ильинична (Пермь, Россия) – бакалавр кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: yourlife2017@outlook.com).

Федотова Ольга Александровна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химические технологии Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: chydinova.olga@rambler.ru).

Старостин Андрей Георгиевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: e-mail: starostin26@yandex.ru).

About the authors

Anastasia A. Yakovleva (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student of the Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: anasyak1503@gmail.com).

Natalia I. Yakusheva (Perm, Russian Federation) – Bachelor of the Department of chemical technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: yourlife2017@outlook.com).

Olga A. Fedotova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, associate professor, state national research polytechnical university of Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: chydinova.olga@rambler.ru).

Andrey G. Starostin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: starostin26@yandex.ru).