

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ПЫЛЕВИДНОЙ ФРАКЦИИ ХЛОРИДА КАЛИЯ В ПРИСУТСТВИИ ДОБАВКИ ЛИГНОСУЛЬФОНАТА

М.В. Черепанова, С.В. Лановецкий

Мария Владимировна Черепанова (ORCID 0000-0002-9786-5603), Сергей Викторович Лановецкий (ORCID 0000-0002-2490-1706)*

Кафедра химические технологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, Пермь, Российская Федерация, 614990

E-mail: syromyatnikova.maria@yandex.ru, lsv98@mail.ru*

В технологии флотационного обогащения сильвинитовой руды достаточно остро стоит проблема утилизации и переработки пылевидной фракции хлорида калия, образующейся на стадии обезвоживания готового продукта в печах кипящего слоя. Наличие большого содержания мелких частиц KCl с диаметром менее 0,25 мм значительно ухудшает потребительские характеристики готового продукта, ведет к росту слеживаемости и пылимости минерального удобрения. В работе представлены исследования процесса гранулирования пылевидной фракции KCl с использованием в качестве связующего реагента раствора лигносульфоната технического, а также выполнена оценка влияния расхода связующего реагента, длительности окатывания, температуры процессов гранулирования и сушки на статическую прочность и фракционный состав гранулированного продукта. Показано, что максимальная доля товарной фракции с размером гранул 0,7-5 мм формируется при использовании 20% раствора лигносульфоната технического, добавляемого в количестве 12%-ной добавки к общей массе гранулируемой смеси. При этом средняя статическая прочность продукта оказалась на 63% выше аналогичного показателя гранул хлорида калия, полученных с 12% добавкой воды. Установлено, что максимальная прочность гранулята формируется в течение 3-х мин обработки исходной смеси циклонной пыли и связующего в барабанном грануляторе при температуре 90 °С. Определены оптимальные временные и температурные параметры сушки гранулированного продукта, способствующие формированию его высоких прочностных характеристик без окисления связующего реагента. Установлено, что процесс обезвоживания гранул при температуре 150 °С в течение 30 мин позволяет достичь экстремальной прочности продукта. Переход в температурный диапазон сушки 200-300 °С приводит к росту пористости гранул, деформации кристаллических мостиков, сформированных в процессе гранулирования циклонной пыли, окислению связующего и, как следствие, потере прочности целевого продукта.

Ключевые слова: хлорид калия, раствор лигносульфоната, циклонная пыль, гранулирование, сушка

EVALUATION OF GRANULATION PARAMETERS OF PULVERED FRACTION OF POTASSIUM CHLORIDE IN THE PRESENCE OF LIGNOSULFONATE ADDITIVE

M.V. Cherepanova, S.V. Lanovetskiy

Maria V. Cherepanova (ORCID 0000-0002-9786-5603), Sergey V. Lanovetskiy (ORCID 0000-0002-2490-1706)*

Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky ave., 29 Perm, 614990, Russia

E-mail: syromyatnikova.maria@yandex.ru, lsv98@mail.ru*

The problem of processing and disposal of the pulverized fraction of flotation potassium chloride formed at the stage of dehydration of the finished product in fluidized bed furnaces is quite

acute. A high content of small particles of KCl with a diameter of less than 0.25 mm significantly worsens the consumer characteristics of the finished product, leads to an increase in caking and dustiness of the mineral fertilizer. Studies of the process of granulation of the pulverized fraction of KCl using a technical lignosulfonate solution as a binder were presented in the article. The effect of binder consumption, pelleting time, temperature of the granulation and drying process on the static strength and fractional composition of the granulated product was evaluated. It was shown that the maximum share of the commercial fraction with a granule size of 0.7 ÷ 5 mm is formed using a 20% solution of technical lignosulfonate, added in the amount of a 12% additive to the total mass of the granulated mixture. At the same time, the average static strength of the product turned out to be 63% higher than that of potassium chloride granules obtained with a 12% addition of water. It was found that the maximum strength of the granulate was formed during a 3-min treatment of the initial mixture of cyclone dust and a binder in a drum granulator at a temperature of 90 °C. The optimal time and temperature parameters for drying the granular product were determined, which contribute to the formation of its high strength characteristics without oxidation of the binder additive. It has been established that the process of dehydrating granules at a temperature of 150 °C for 30 min allows achieving extreme strength of the product. The transition to the drying temperature range of 200-300 °C leads to an increase in the porosity of the granules, deformation of the crystalline bridges formed during the granulation of cyclone dust, oxidation of the binder and, as a result, loss of strength of the target product.

Key words: potassium chloride, lignosulfonate solution, cyclone dust, granulation, drying

Для цитирования:

Черепанова М.В., Лановецкий С.В. Оценка параметров гранулирования пылевидной фракции хлорида калия в присутствии добавки лигносульфоната. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 88–96

For citation:

Cherepanova M.V., Lanovetskiy S.V. Evaluation of granulation parameters of pultered fraction of potassium chloride in the presence of lignosulfonate additive. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 6. P. 88–96

ВВЕДЕНИЕ

В технологии получения гранулированного флотационного хлорида калия (КС1) на стадиях прессования, дробления и сушки [1] образуется значительное количество некондиционного продукта в виде циклонной пыли (ЦП). Как правило, на различных технологических нитках количество образующейся пыли значительно отличается и зависит от производительности самой линии. В среднем, количество циклонной пыли составляет 10-20% от товарного гранулированного хлорида калия [2, 3]. При этом она постоянно циркулирует в процессе в виде ретур, снижая качество гранулированного КС1, увеличивая экономические затраты производства и пылимость в помещении [4, 5]. В связи с этим, для повышения качества готового продукта и снижения экономических затрат целесообразно выводить циклонную пыль из технологического процесса с последующей ее переработкой.

Обзор научной литературы показал, что на сегодняшний день существует ряд технических и технологических решений, позволяющих осуществить утилизацию и переработку циклонной пыли.

Так, в работах [6, 7] авторы предлагают возвращать пылевидную фракцию хлорида калия, образующуюся на стадии сушки галургического или флотационного хлорида калия, в отделение регулируемой вакуум-кристаллизации в виде раствора с заданной концентрацией КС1, что позволит снизить расход воды на стадию кристаллизации, уменьшить потери хлорида калия с маточными растворами и решить проблему получения обеспыленного целевого продукта.

В публикациях [8-10] рекомендуется предварительно при помощи различных связующих реагентов осуществлять агломерацию циклонной пыли в сушильно-грануляционном отделении с последующим смещением полученных агломератов и мелкозернистых кристаллов КС1, направляя образующуюся смесь на стадию прессования. Это позволит повысить качество гранулированного хлорида калия и решить проблему утилизации пылевидной фракции.

В работах [11-13] предложено использовать циклонную пыль в качестве сырья для синтеза комплексных минеральных удобрений.

Таким образом, в качестве одного из вариантов решения проблемы утилизации и переработки циклонной пыли целесообразно реализовать

технологии грануляции с применением различных реагентов, выступающих в качестве связующего. Выбор таких реагентов является достаточно сложной проблемой, поскольку оказывает существенное влияние на механизм процесса грануляции, качество целевого продукта и экономическую эффективность производства [14, 15]. Одним из таких реагентов является лигносульфонат (ЛСТ) – продукт технологической переработки целлюлозы [16-18]. Данный реагент нашел применение в качестве связующего при гранулировании удобрений, кормовых добавок [19-23], изготовлении керамических пропантов, строительных и полимерных композиционных материалов [24-26].

Исходя из вышеизложенного, целью представленной работы явилось исследование процесса гранулирования пылевидной фракции хлорида калия с использованием в качестве связующего реагента раствора лигносульфоната, а также оценка влияния расхода связующего реагента, длительности окатывания, температуры процесса гранулирования и сушки на статическую прочность и фракционный состав гранулированного продукта.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования использовали пылевидную фракцию флотационного КСl, формирующуюся в циклонах после процесса обезвоживания в печах кипящего слоя готового продукта на БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий». Химический состав циклонной пыли представлен следующими компонентами (мас. %): КСl – 90,88; NaCl – 5,62; нерастворимый остаток (н.о.) – 2,08; CaSO₄ – 0,81; MgCl₂·6H₂O – 0,25; амины – 0,013. Анализ гранулометрического состава исследуемого продукта, представленный на рис. 1, выполнен при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц Malvern Mastersizer 2000. Средний размер частиц циклонной пыли составил 247,37 мкм.

Для исследования процесса грануляции циклонной пыли хлорида калия в качестве связующих использовали воду и водные растворы лигносульфоната технического с концентрацией 10 и 20 мас.%. Исходный лигносульфонат получен на АО «Соликамскбумпром» (г. Соликамск, Пермский край) из щелоков бисульфитной варки целлюлозы по ТУ 2455-028-00279580-2014.

Методика изучения процесса гранулирования пылевидной фракции КСl заключалась в следующем. На первом этапе проводили смешение циклонной пыли хлорида калия с расчетным количеством связующего. Концентрация связующих компонентов в анализируемой смеси варьирова-

лась в диапазоне 10-14 мас.%. После чего однородную пластифицирующую массу загружали в нагретый до заданной температуры лабораторный барабанный гранулятор с углом наклона 3°, оснащенный электрическим приводом для вращения барабана с частотой 40 мин⁻¹. Продолжительность гранулирования смеси в барабане изменялась в диапазоне 60 с до 360 с, а температура процесса варьировалась в интервале от 25 °С до 90 °С. Сформированные в процессе грануляции гранулы хлорида калия в течение 0,5 ч сушили при температуре 150 °С в электропечи SNOL 0,2/1250. После этого оценивали среднюю статическую прочность и фракционный состав полученного продукта.

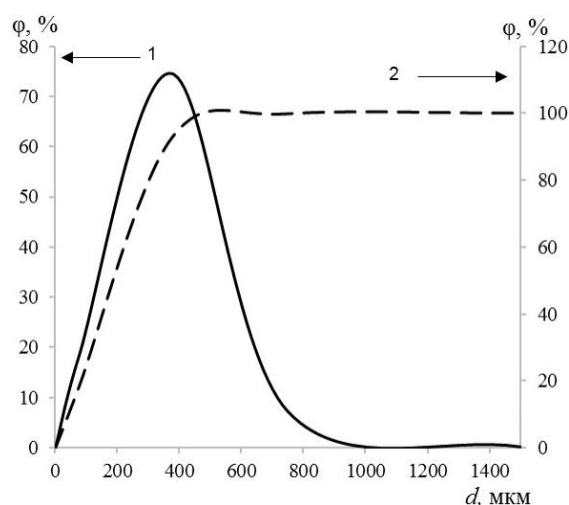


Рис. 1. Дифференциальная (1) и интегральная (2) кривая распределения частиц хлорида калия по размерам
Fig. 1. Differential (1) and integral (2) particle size distribution curve of potassium chloride

Для оценки фракционного состава использовался ситовой анализ. Замеры статической прочности гранул осуществляли на приборе ИПГ-1М, используемом для измерения силы разрушения гранулы согласно ГОСТ 21560.2-82.

Качество получаемого продукта и эффективность гранулирования оценивали по величине статической прочности гранул и выходу товарной фракции, имеющей размер от 0,7 до 5,0 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты первой серии экспериментов по оценке влияния концентрации и вида связующего на фракционный состав, статическую прочность гранул (σ) и их средний размер (d) представлены в табл. 1. Продолжительность и температура процесса в барабанном грануляторе для данной серии экспериментов оставались постоянными и составили 180 с и 90 °С соответственно.

Из анализа данных, представленных в таблице, видно, что с ростом концентрации связующих возрастает статическая прочность формирующихся гранул и их средний размер. Так, увеличение доли воды в обрабатываемой смеси с 10 до 14% приводит к росту прочности гранул в 1,24 раза (с 4,5 до 5,6 Н/гранулу), при этом средний размер гранул возрастает в 3,4 раза (с 1,16 до 3,95 мм). Аналогичное изменение концентрации 10 и 20% водных растворов лигносульфоната способствует 1,5 кратному росту статической прочности гранул и практически 3-х кратному изменению их среднего размера.

Таблица 1

Оценка влияния концентрации и вида связующего на характеристики гранулированного продукта
Table 1. Evaluation of the influence of the concentration and binder's type on the granular product characteristics

Концентрация связующего, мас. %	Гранулометрический состав, %			σ , Н/гранула	d, мм
	< 0,7 мм	0,7-5 мм (товарная фракция)	> 5 мм		
Вода					
10,0	52,93	43,52	3,55	4,5	1,16
11,2	44,05	45,63	10,31	4,8	1,58
12,0	21,33	56,40	22,27	5,1	2,61
12,8	12,86	54,11	33,03	5,5	3,23
14,0	6,35	47,60	46,05	5,6	3,95
Водный раствор лигносульфоната (10 мас.%)					
10,0	55,62	37,30	7,08	6,5	1,36
11,2	19,75	54,31	25,94	7,1	2,83
12,0	9,66	55,21	35,13	8,0	3,46
12,8	7,70	47,91	44,39	8,3	3,76
14,0	5,26	46,21	48,52	10,4	4,02
Водный раствор лигносульфоната (20 мас.%)					
10,0	53,81	38,07	8,12	7,2	1,44
11,2	15,99	57,87	26,14	7,6	2,87
12,0	7,83	58,48	33,69	8,3	3,33
12,8	4,44	53,98	41,58	9,1	3,77
14,0	3,50	46,61	49,89	11,1	4,17

Показано, что доля товарной фракции с размером гранул 0,7-5 мм при изменении концентрации анализируемых связующих реагентов в интервале от 10 до 14% проходит через экстремум. При этом для всех связующих максимальный выход товарной фракции соответствовал 12 %-ной доле реагентов от общей массы гранулируемой смеси, а максимальное количество товарной фракции гра-

нул хлорида калия (58,48% от общей массы гранулята) удалось получить с добавкой 20%-го раствора лигносульфоната. В связи с этим в дальнейших исследованиях использовался именно этот реагент.

Также необходимо отметить, что максимальная прочность гранул (11,1 Н/гранула) достигнута при использовании 20%-ного водного раствора лигносульфоната в количестве 14% от общей массы гранулируемого концентрата. Однако выход товарной фракции при этих условиях оказался почти на 12% меньше выхода товарной фракции, полученной при 12%-ной доле исследуемого реагента в смеси обрабатываемой циклонной пыли.

Сравнение прочностных характеристик гранул, сформированных при оптимальной (по максимальному выходу товарной фракции) доле реагента в концентрате, показало, что использование водных растворов лигносульфоната (10 и 20%) в качестве связующего значительно эффективнее отражается на прочностных характеристиках гранулята, чем использование воды. Так средняя статическая прочность гранул с 12%-ной долей водных растворов лигносульфоната оказалась на 57-63% выше аналогичного показателя гранул, полученных с 12% добавкой воды.

Во второй серии экспериментов была проведена оценка влияния длительности процесса гранулирования (τ) на выход товарной фракции и прочность гранул хлорида калия (табл. 2). В качестве связующего использовался 20 %-ный водный раствор лигносульфоната, вводимый в количестве 12% от общей массы гранулируемой циклонной пыли. Температура процесса, так же, как и в первой серии экспериментов, оставалась постоянной и составила 90 °С.

Таблица 2

Зависимость статической прочности и фракционного состава гранул от длительности окатывания
Table 2. Dependence of static strength and fractional composition of granules on the duration of palletization

τ , с	Гранулометрический состав, %			σ , Н/гранула
	< 0,7 мм	0,7-5 мм	> 5 мм	
60	50,2	41,8	8,0	6,7
120	25,2	53,4	21,4	7,2
180	7,8	58,5	33,7	8,3
240	7,0	54,4	38,6	7,9
300	5,8	50,7	43,5	7,6
360	4,9	42,5	52,6	7,0

Установлено, что с увеличением длительности обработки гранулируемой массы циклонной пыли в интервале от 1 до 3 мин происходит увели-

чение и доли товарной фракции, и прочности формирующихся гранул хлорида калия. При этом доля товарной фракции выросла на 16,7% (с 41,8 до 58,5%), а средняя статистическая прочность гранул увеличилась на 24% (с 6,7 до 8,3 Н/гранула). Дальнейшее увеличение продолжительности гранулирования с 3 до 6 мин привело к ожидаемому росту доли крупной фракции более 5 мм (с 33,7 до 52,6%) и снижению количества товарной фракции гранулята на 16%. Статическая прочность гранул при продолжительности гранулирования более 3 мин также начала снижаться, что явилось следствием роста доли гранул большого размера и, соответственно, снижением удельной доли связующего в грануле. Таким образом, по результатам второй серии экспериментов установлено, что оптимальная длительность окатывания смеси циклонной пыли и 20% водного раствора лигносульфоната в барабанном грануляторе составила 180 с.

В третьей серии экспериментальных исследований выполнена оценка влияния температуры окатывания циклонной пыли в барабанном грануляторе на выход товарной фракции (η , %) и статическую прочность гранул KCl. Температура процесса гранулирования варьировалась в диапазоне 25-90 °С и поддерживалась за счет подачи теплоносителя в рубашку барабана. В качестве теплоносителя использовалась вода, нагреваемая в жидкостном термостате марки ВТ-4.2. Концентрация связующего реагента (20%-ного раствор лигносульфоната) во всех опытах данной серии оставалась постоянной – 12% от общей массы циклонной пыли. Длительность процесса, установленная в предыдущих экспериментах, также не изменялась и составила 3 мин.

На рис. 2 показана зависимость доли товарной фракции и прочности гранул KCl от температурного режима гранулирования циклонной пыли.

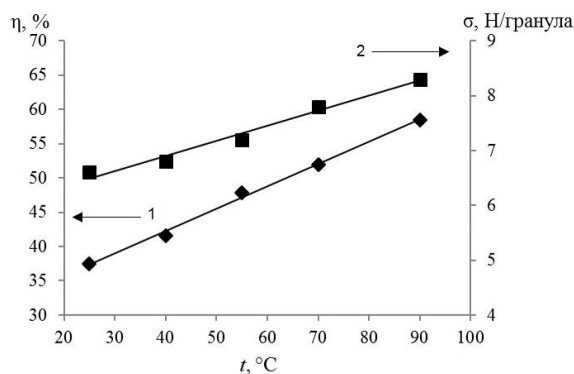


Рис. 2. Влияние температуры гранулирования на выход товарной фракции (1) и статическую прочность гранул KCl (2)
 Fig. 2. Influence of the granulation temperature on the commodity fraction yield (1) and the static strength of the granules of KCl (2)

Установлено, что с ростом температуры окатывания смеси циклонной пыли и связующего происходит симбатное изменение как доли товарной фракции, так и средней статической прочности образующихся гранул. Так, при изменении температуры гранулирования с 25 до 90 °С выход товарной фракции гранулята увеличился на 21% (с 37,5 до 58,5%), а статическая прочность гранул выросла на 25,8% (с 6,6 до 8,3 Н/гранула). Рост температуры оказывает влияние как на процесс удаления влаги, так и на снижение вязкости связующего реагента. Изменение реологических характеристик делает смесь более пластичной, что приводит к повышению эффективности сцепления частиц пыли хлорида калия между собой и способствует росту доли товарной фракции. Наличие воды в связующем приводит к частичному растворению кристаллических частиц циклонной пыли, а процесс дегидратации, интенсифицирующийся с ростом температуры, способствует созданию пересыщений и формированию кристаллических мостиков между микрочастицами KCl в местах соприкосновения кристаллов, что приводит к росту прочностных характеристик.

Таким образом установлено, что оптимальная температура гранулирования пылевидной фракции хлорида калия с добавкой лигносульфоната составляет 90 °С.

Известно, что получению прочных гранул способствует не только сама стадия гранулирования, протекающая при повышенных температурах, но и процесс термической обработки [27]. В связи с этим, четвертая серия экспериментальных исследований была направлена на определение оптимальной температуры и длительности процесса сушки гранул циклонной пыли, полученных по ранее установленным оптимальным условиям гранулирования. Температура сушки гранул изменялась в диапазоне от 100 до 300 °С, а длительность обезвоживания варьировалась в диапазоне от 5 до 50 мин. Оценку термической стабильности лигносульфоната проводили при помощи дифференциально-термического анализа на приборе STA 449 C Jupiter в температурном диапазоне 20-600 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин.

В ходе исследований оценивали зависимости статической прочности гранул (σ), степени (x) и скорости ($dx/d\tau$) обезвоживания, от температуры (t) и продолжительности сушки (τ). Результаты исследований представлены в табл. 3 и на рис. 3.

Как видно из табл. 3, с ростом температуры и длительности процесса сушки происходит закономерное увеличение степени обезвоживания благодаря положительному влиянию температуры

процесса на рост коэффициента молекулярной диффузии и снижение вязкости жидкой фазы. На 5 мин сушки скорость процесса достигает максимального значения и, примерно, на 10 мин большая часть свободной влаги испаряется. В дальнейшем, после удаления влаги из крупных пор гранулята, скорость сушки начинает значительно падать из-за роста внутреннего диффузионного сопротивления перемещению жидкой фазы по микро и мезопорам капилляров, сформированных в процессе окатывания гранул циклонной пыли.

Таблица 3

Влияние продолжительности и температуры сушки на степень и скорость обезвоживания гранул KCl
Table 2. Effect of drying duration and temperature on the degree and rate of dehydration of KCl granules

$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{мин}$	$x, \%$	$dx/d\tau, \%/ \text{мин}$
100	5	7,0	1,4
	10	7,8	0,16
	20	8,0	0,02
	30	8,1	0,01
	50	8,2	0,005
150	5	7,5	1,5
	10	8,5	0,2
	20	8,8	0,03
	30	8,9	0,01
	50	9,0	0,005
200	5	7,8	1,56
	10	9,0	0,24
	20	9,3	0,03
	30	9,4	0,01
	50	9,5	0,005
300	5	8,5	1,7
	10	10,0	0,3
	20	10,4	0,035
	30	10,5	0,01
	50	10,6	0,005

По результатам анализа данных о скорости обезвоживания гранул хлорида калия видно, что наиболее интенсивно процесс удаления влаги протекает при температурах, превышающих 100°C , а это непосредственно может оказать влияние на статистическую прочность продукта. На рис. 3 показано, что прочность гранул в исследуемом интервале температур с ростом длительности процесса обезвоживания достигает максимального значения в течение 30 мин. При этом наименьшими прочностными характеристиками обладают гранулы, высушенные при 100°C (7,2 Н/гранула), а наибольшая прочность к разрушению формируется у продукта при температуре сушки 150°C (8,3 Н/гранула). В температурном диапазоне обезвоживания

$200\text{--}300^\circ\text{C}$ максимальная прочность гранул начинает снижаться на 3,6 и 7,2% соответственно.

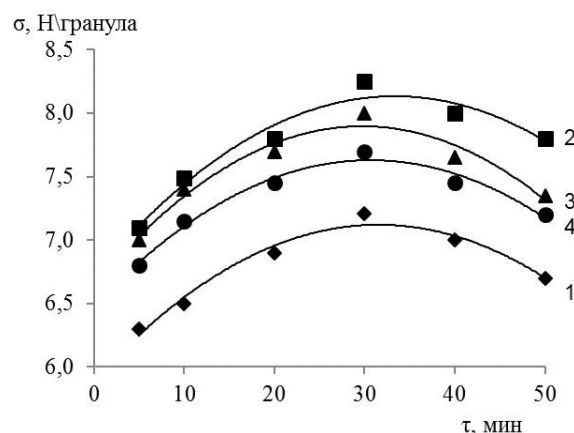


Рис. 3. Влияние температуры и длительности обезвоживания на статическую прочность гранулированного продукта: 1 – $t=100^\circ\text{C}$, 2 – $t=150^\circ\text{C}$, 3 – $t=200^\circ\text{C}$, 4 – $t=300^\circ\text{C}$

Fig. 3. Influence of temperature and duration of dehydration on the static strength of the granular product: 1 – $t=100^\circ\text{C}$, 2 – $t=150^\circ\text{C}$, 3 – $t=200^\circ\text{C}$, 4 – $t=300^\circ\text{C}$

С ростом температуры сушки в диапазоне $100\text{--}150^\circ\text{C}$ происходит относительно спокойное удаление влаги с поверхности гранулированного продукта, что становится причиной процессов перекристаллизации кристаллических частиц хлорида калия, способствующих росту статической прочности высушаемых гранул. В температурном диапазоне $200\text{--}300^\circ\text{C}$ прочность гранул начинает снижаться, так как при резком возрастании температурного градиента с 90°C (температура гранул на стадии грануляции) до $200\text{--}300^\circ\text{C}$ внутренняя влага в виде пара с высокой скоростью удаляется с поверхности частиц и частично разрушает их структуру, приводя к росту пористости, вздутий, каверн, деформации кристаллических мостиков, сформированных в процессе гранулирования циклонной пыли, и как следствие, потере прочности целевого продукта.

Кроме того, процесс дегидратация гранул при температуре $200\text{--}300^\circ\text{C}$ сопровождается интенсивным окислением и разрушением связующего, что подтверждается результатами дифференциально-термического анализа лигносульфоната (рис. 4).

Показано, что удаление влаги с минимальным эндотермическим эффектом происходит, примерно до 150°C . При температуре 185°C убыль массы реагента составляет почти 5%. Процесс окисления лигносульфоната начинается в температурном интервале $185\text{--}200^\circ\text{C}$. Химические превращения протекают в 2 стадии. Первая стадия осу-

шествуется в диапазоне 200-400 °С. При этом выгорает около 25% связующего. Вторая стадия, происходящая в диапазоне 400-600 °С, сопровождается потерей еще, примерно, 19% реагента.

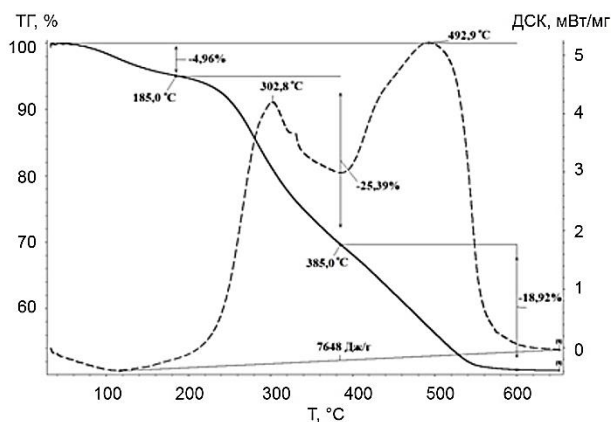


Рис. 4. Термограмма лигносульфоната технического:
1 – кривая ТГ, 2 – кривая ДСК
Fig. 4. Thermogram of technical lignosulfonate: 1 – TG curve, 2 – DSC curve

Таким образом, совокупность процессов, протекающих при сушке гранул в интервале 200-300 °С приводит к разрушению сформированных связей, изменению структуры и снижению статической прочности гранул циклонной пыли.

ВЫВОДЫ

В работе представлены исследования одного из вариантов решения проблемы утилизации

ЛИТЕРАТУРА

1. **Потапов И.С., Пойлов В.З.** Улучшение товарных характеристик гранулированного хлорида калия. *Химия. Экология. Урбанистика*. 2021. Т. 4. С. 67-70.
2. **Классен В., Гришаев И.Г., Шомин И.П.** Гранулирование. М.: Химия. 1991. 240 с.
3. **Вилесов Н.Г., Схрипков В.Я., Ломазов В.Л., Танченко И.М.** Процессы гранулирования в промышленности. М.: Техника. 1976. 192 с.
4. **Прушак В.Я., Кондратчук Н.Ю., Высоцкая Н.А.** Разработка новых технических решений по увеличению выпуска гранулированного хлорида калия с применением валковых прессов, изготавливаемых в ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством». *Тр. БГТУ*. 2020. Сер. 2. № 1. С. 62-67.
5. **Басалай И.А., Бельская Г.В.** Анализ способов газоочистки в технологическом процессе гранулирования хлорида калия. Сб. тр. международной научно-практической конференции: Перспективы и инновации в горном деле. Минск: БНТУ. 2018. С. 166-172.
6. **Сафрыгин Ю.С., Паскина А.В., Букша Ю.В.** Технология производства галургического хлористого калия в России и Республике Беларусь. *Горный журн.* 2007. № 8. С. 25-30.

и переработки пылевидной фракции хлорида калия посредством гранулирования с использованием в качестве связующего реагента раствора лигносульфоната технического.

Проведена оценка влияния концентрации и расхода связующего реагента, продолжительности и температуры процессов, протекающих в барабанном грануляторе и сушильной печи, на гранулометрические и прочностные характеристики гранулированного продукта.

Установлено, что введение 20%-ной добавки лигносульфоната в количестве 12% от общей массы гранулируемой смеси циклонной пыли при температуре окатывания в барабанном грануляторе 90 °С в течении 3 мин с частотой вращения барабана 40 мин⁻¹ позволяет получать максимальный выход товарной фракции 0,7-5 мм, превышающей 58%.

Анализ процесса сушки показал, что максимальная прочность гранул после стадии окатывания достигается в течении 30 мин при температуре 150 °С. Дальнейший рост температуры сушки является нецелесообразным и приводит к потере прочности гранулированного продукта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. **Potapov I.S., Poilov V.Z.** Improvement of product characteristics of granulated potassium chloride. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2021. V. 4. P. 67-70 (in Russian).
2. **Klassen P.V., Grishaev I.G., Shomin I.P.** Granulation. M.: Khimiya. 1991. 240 p. (in Russian).
3. **Vilesov N.G., Skhripkov V.Ya., Lomazov V.L., Tanchenko I.M.** Industrial granulation processes. M.: Tekhnika. 1976. 192 p. (in Russian).
4. **Prushak V.Ya., Kondratchik N.Yu., Vysotskaya N.A.** Development of new technical solutions to increase production of granulated potassium chloride with application of roll compactors manufactured by JSC «Soligorsk institute of resources saving problems with pulot of production». *Tr. BGTU*. 2020. V. 2. N 1. P. 62-67.
5. **Basalai I.A., Bel'skaya G.V.** Analysis of gas cleaning methods in the technological process of potassium chloride granulation. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Prospects and Innovations in Mining. Minsk: BNTU. 2018. P. 166-172.
6. **Safrygin Yu.S., Paskina A.V., Buksha Yu.V.** Manufacturing technology of halurgic potassium chloride in Russia and Belarus. *Gornyi Zhurn.* 2007. N 8. P. 25-30 (in Russian)
7. **Paskina A.V., Panasyuk E.B.** Obtaining dedusted potassium chloride in the galurgical processing of potash ores. *Gornyi Zhurn.* 2021. N 4. P. 73-76 (in Russian).

7. Паскина А.В., Панасюк Е.Б. Получение обеспыленного хлористого калия при галургической переработке калийных руд. *Горный журн.* 2021. № 4. С. 73-76.
8. Черепанова М.В., Кузина Е.О., Пойлов В.З., Мунин Д.А. Исследование процесса агломерации пылевидного галургического хлорида калия. *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов.* 2019. Т. 330. № 4. С. 68–77. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/197.
9. Андреева Н.К. Повышение качества калийных удобрений на основе улучшения физико-химических свойств исходного продукта. *Горный журн.* 2016. № 4. С. 76-79. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.15.
10. Овчинников Л.Н. Исследование процесса получения комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия на основе торфа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 100-104. DOI: 10.6060/tcct.2017609.5600.
11. Сквородников П.В., Черепанова М.В. Способы гранулирования органо-минеральных удобрений. *Вестн. ПНИПУ. Хим. технол. и биотехнол.* 2017. № 3. С. 117–127. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.3.10.
12. Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Особенности получения NPK-удобрений методом окатывания. *Горная механика и машиностр.* 2020. № 4. С. 79-85.
13. Черепанова М.В., Пойлов В.З. Взаимодействие связующего силиката калия с примесными компонентами при формировании гранул KCl методом окатывания. *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов.* 2017. Т. 328. № 10. С. 41-49.
14. Черепанова М.В. Окатывание циклонной пыли хлорида калия с использованием связующих различного типа. *Фундаментал. исслед.* 2017. № 5. С. 93-97.
15. Чередниченко Д.В., Воробьева Е.В., Крутько Н.П., Басальга И.И., Матрунчик Ю.В. Влияние связующих реагентов различной природы на прочность гранул хлорида калия. *Журн. прикл. химии.* 2007. Т. 80. № 9. С. 1416-1420. DOI: 10.1134/S1070427207090029.
16. Феофилова Е.П., Мысякина И.С. Лигнин: химическое строение, биодegradация, практическое использование. *Прикл. биохимия и микробиология.* 2016. Т. 52. № 6. С. 559–569. DOI: 10.1134/S0003683816060053.
17. Носкова О.А., Федосеев М.С. Химия древесины и синтетических полимеров. Пермь: Изд-во ПГТУ. 2007. 53 с.
18. Тептерева Г.А., Пахомов С.И., Четвертнева И.А., Каримов Э.Х., Егоров М.П., Мовсумзаде Э.М., Евстигнеев Э.И., Васильев А.В., Севастьянова М.В., Волошин А.И., Нифантьев Н.Э., Носов В.В., Докичев В.А., Бабаев Э.Р., Роговина С.З., Берлин А.А., Фахреева А.В., Баулин О.А., Колчина Г.Ю., Воронов М.С., Староверов Д.В., Козловский И.А., Козловский Р.А., Тарасова Н.П., Занин А.А., Кривобородов Е.Г., Каримов О.Х., Флид В.Р., Логинова М.Е. Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 9. С. 5-122. DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.
19. Яковлева А.А., Якушева Н.И., Федотова О.А., Старостин А.Г. Исследование процесса гранулирования струвита методом окатывания. *Вестн. ПНИПУ. Хим. технология и биотехнология.* 2020. № 2. С. 208–220. DOI: 10.15593/2224-9400/2020.2.16.
20. Овсянникова А.В., Старостин А.Г., Федотова О.А. Исследование процесса гранулирования глазерита методом окатывания. *Вестн. ПНИПУ. Хим. технология и биотехнология.* 2020. № 2. С. 198–207. DOI: 10.15593/2224-9400/2020.2.15.
8. Cherepanova M.V., Kuzina E.O., Poylov V.Z., Munin D.A. Research of pulverized halurgic potassium chloride agglomeration. *Izv. Tomsk. Politekh. Un-ta. Inzhiniring Georesursov.* 2019. V. 330. N 4. P. 68-77 (in Russian). DOI: 10.18799/24131830/2019/4/197.
9. Andreeva N.K. Increase in quality of potash fertilizers based on improvement of physical-chemical properties in the initial product. *Gornyi Zhurn.* 2016. N 4. P. 76-79 (in Russian). DOI: 10.17580/gzh.2016.04.15.
10. Ovchinnikov L.N. Investigation of process of obtaining complex granulated organo-mineral fertilizers of prolonged action based on peat. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2017. V. 60. N 9. P. 100-104 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017609.5600.
11. Skovorodnikov P.V., Cherepanova M.V. The methods of granulation of organomineral fertilizers. *Vest. PNRPU. Khim. Tekhnol. Biotekhnol.* 2017. N 3. P. 117–127 (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9400/2017.3.10.
12. Vysotskaya N.A., Frantskevich V.S. Features of obtaining NPK-fertilizers by pelletizing method. *Gornaya Mekhanika Mashinostr.* 2020. N 4. P. 79-85 (in Russian).
13. Cherepanova M.V., Poylov V.Z. Interaction of a potassium silicate binder with impurity components during formation of KCl granules by the pelletizing method. *Izv. Tomsk. Politekh. Un-ta. Inzhiniring Georesursov.* 2017. V. 328. N 10. P. 41-49 (in Russian).
14. Cherepanova M.V. Balling cyclone dust of potassium chloride using of various types of binders. *Fundament. Issled.* 2017. N 5. P. 93-97 (in Russian).
15. Cherednichenko D.V., Vorob'eva E.V., Krut'ko N.P., Basalyga I.I., Matrunchik Yu.V. Effect of binder reagents of varied nature on the strength of potassium chloride grains. *Russ. J. Appl. Chem.* 2007. V. 80. N 9. P. 1453-1456. DOI: 10.1134/S1070427207090029.
16. Feofilova E.P., Mysyakina I.S. Lignin: chemical structure, biodegradation, practical use. *Prikl. Biokhim. Mikrobiolog.* 2016. V. 52. N 6. P. 559-569 (in Russian). DOI: 10.1134/S0003683816060053.
17. Noskova O.A., Fedoseev M.S. Chemistry of wood and synthetic polymers. Perm: Izd-vo PSTU. 2007. 53 p. (in Russian).
18. Tepтерева G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov E.H., Egorov M.P., Movsumzade E.M., Evstigneev E.I., Vasiliev A.V., Sevastyanova M.V., Voloshin A.I., Nifantsev N.E., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev E.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhreeva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S., Staroverov D.V., Kozlovsky I.A., Kozlovsky R.A., Tarasova N.P., Zanin A.A., Krivoborodov E.G., Karimov O.Kh., Flid V.R., Loginova M.E. Renewable natural raw materials. Structure, properties, application prospects. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 9. P. 5-122 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.
19. Yakovleva A.A., Yakusheva N.I., Fedotova O.A., Starostin A.G. Research of the process of granulation of struvite by the method of pelletizing. *Vest. PNRPU. Khim. Tekhnol. Biotekhnol.* 2020. N 2. P. 208–220 (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9400/2020.2.16.
20. Ovsyannikova A.V., Starostin A.G., Fedotova O.A. Study of the glaserite granulation process by the pelletizing method. *Vest. PNRPU. Khim. Tekhnol. Biotekhnol.* 2020. N 2. P. 198–207 (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9400/2020.2.15.

21. **Берсенеv И.С., Берсенеv Е.С., Колясников А.Ю.** Перспективы утилизации твердых минеральных отходов в производстве минеральных удобрений. *Наука и пр-во Урала*. 2018. № 14. С. 2-3.
22. **Фрам Э.** Лигносulфонат в производстве гранул. *Животноводство России*. 2017. №2. С. 60-61.
23. **Захидулина С.Х., Долганова В.Л.** Гранулирование отходов и трудно используемых продуктов калийных предприятий. *Вестн. ПНИПУ. Хим. технология и биотехнология*. 2012. № 13. С. 77-84
24. **Хвастунов В.Л., Махамбетова К.Н., Чиркина М.А., Колесников И.В., Серегин А.А.** Влияние пластифицирующих добавок на физико-механические свойства виброуплотненных и вибропрессованных минеральношлаковых композитов. *Образование и наука в совр. мире. Инновации*. 2019. № 5(24). С. 241-249.
25. **Пилипенко К.В., Попов М.Г.** Применение пластифицирующих добавок в строительстве. *Совр. наука и практика*. 2016. № 3(8). С. 13-17.
26. **Сабуров Х.М., Палвуняизова Д.А., Мухамедгалиев Б.А.** Применение композиционных материалов на основе отходов для закрепления песков Приаралья. *Хим. пром-сть*. 2020. Т. 97. № 2. С. 82-87.
27. **Рудаковская Т.Г., Жданович И.Б., Шевчук В.В., Лабкович О.Н.** Влияние условий сушки на свойства полученных методом окатывания гранул хлорида калия. *Изв. Нац. АН Беларуси. Сер. хим. наук*. 2012. № 1. С. 96-99.
21. **Bersenev I.S., Bersenev E.S., Kolyasnikov A.Yu.** Prospects the disposal of solid mineral wastes in manufacture of mineral fertilizers. *Nauka Pr-vo Urala*. 2018. N 14. P. 2-3 (in Russian).
22. **Fram E.** Lignosulphonate in production of pellets. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2017. N 2. P. 60-61 (in Russian).
23. **Zakhidullina S.Kh., Dolganova V.L.** Granulation of waste and hard-to-use products of potash plants. *Vest. PNRPU. Khim. Tekhnol. Biotekhnol.* 2012. N 13. P. 77-84 (in Russian).
24. **Khvastunov V.L., Makhambetova K.N., Chirkina M.A., Kolesnikov I.V., Seregin A.A.** The influence of plasticizing additives on the physical-mechanical properties of vibrocompacted and vibropressed mineralslag composites. *Obrazovanie Nauka Sovr. Mire. Innovatsii*. 2019. N 5(24). P. 241-249 (in Russian).
25. **Pilipenko K.V., Popov M.G.** Plasticizers application in construction. *Sovr. Nauka Praktika*. 2016. N 3(8). P. 13-17 (in Russian).
26. **Saburov Kh.M., Palvuniyazova D.A., Mukhamedgaliev B.A.** Using composition material on base of wastes for fastening sands of Priaraliya. *Khim. Promysh.* 2020. V. 97. N 2. P. 82-87 (in Russian).
27. **Rudakovskaya T.G., Zhdanovich I.B., Shevchuk V.V., Labkovich O.N.** The effect of drying conditions on properties of potassium chloride granules obtained by palletization. *Izv. Nats. AN Belarusi. Ser. Khim. Nauk*. 2012. N 1. P. 96-99.

Поступила в редакцию 28.01.2022
Принята к опубликованию 25.04.2022

Received 28.01.2022
Accepted 25.04.2022