

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-293-302>  
УДК 661.152:622.788



*Оригинальная статья*

**О. М. Волчек<sup>1</sup>, В. Я. Прушак<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>*Барановичский государственный университет,  
ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская область, Республика Беларусь*  
<sup>2</sup>*Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством,  
ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь*

**ПОДГОТОВКА ИСХОДНОГО ПИТАНИЯ УСТАНОВОК  
ГРАНУЛИРОВАНИЯ ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ**

**Аннотация.** Выполнена оценка существующих технологических решений в области подготовки исходного питания установок гранулирования хлористого калия сильвинитовых обогатительных фабрик ОАО «Беларуськалий», соответствия этих решений выработанным теоретическим представлениям и рекомендациям. Установлено, что в отделениях грануляции фабрик с флотационным методом обогащения на этапе гомогенизации шихты по гранулометрическому составу и влажности и при совершенствовании ее кристаллической структуры процесс агломерации частиц происходит недостаточно эффективно вследствие технического несовершенства используемых аппаратов-агломераторов. При этом имеет место значительный перерасход структурообразующего реагента по сравнению с количеством, рассчитанным согласно стехиометрии ионов кальция и магния, что приводит к избыточному загрязнению готовой продукции карбонатом натрия. Для устранения выявленного недостатка предложено использовать в качестве аппарата-агломератора специально разработанный для агломерирования хлористого калия турболопастной смеситель-агломератор марки ТЛА-080 производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». Показано, что повышение физико-механических и физико-химических характеристик гранулированного хлористого калия обогатительной фабрики с галургическим методом обогащения может быть обеспечено путем внедрения разработанной технологии структурной агломерации шихты, поступающей в установки гранулирования, в турболопастных смесителях-агломераторах марки ТЛА-080 без использования структурообразующих реагентов.

**Ключевые слова:** хлористый калий, агломерирование, гранулирование, смеситель-агломератор, структурообразующий реагент

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** Волчек Ольга Михайловна – старший преподаватель Барановичского государственного университета. E-mail: leolya07@mail.ru; Прушак Виктор Яковлевич\* – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, технический директор Солигорского Института проблем ресурсосбережения с Опытным производством. E-mail: ipr@sipr.by

**Вклад авторов:** Волчек Ольга Михайловна – планирование исследования, разработка методологии исследования, сбор, анализ и систематизация данных, обобщение результатов исследования, написание и оформление текста рукописи; Прушак Виктор Яковлевич – обоснование концепции, обсуждение результатов исследования, редактирование текста рукописи.

**Для цитирования:** Волчек, О. М. Подготовка исходного питания установок гранулирования хлористого калия / О. М. Волчек, В. Я. Прушак // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 293–302. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-293-302>

*Поступила в редакцию: 15.06.2023*

*Утверждена к публикации: 30.11.2023*

*Подписана в печать: 15.12.2023*

Original articleOlga M. Volchek<sup>1</sup>, Viktor Ya. Prushak<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Baranovichi State University,  
21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus<sup>2</sup>Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production,  
69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus

## PREPARATION OF FEEDSTOCK FOR POTASSIUM CHLORIDE GRANULATION PLANTS

**Abstract.** The assessment of existing technological solutions in the field of preparation of feedstock for potassium chloride granulation plants of silvinit processing plants of JSC “Belaruskali”, compliance of these solutions with the developed theoretical concepts and recommendations was carried out. It has been established that in the granulation departments of factories with the flotation method of enrichment at the stage of homogenization of the charge by granulation composition and humidity, and the improvement of its crystal structure, the process of particle agglomeration is not efficient enough due to the technical imperfection of the used agglomerators. At the same time, there is a significant overspending of the structure-forming reagent compared to the amount calculated in accordance with the stoichiometry of calcium and magnesium ions, which leads to excessive contamination of the finished product with sodium carbonate. To eliminate the identified drawback, it is proposed to use as an agglomeration device a turbo-blade agglomerator mixer of the TLA-080 brand manufactured by the JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, specially designed for agglomeration of potassium chloride. It has been established that an increase in the physico-mechanical and physico-chemical characteristics of granulated potassium chloride of a processing plant with a halurgic enrichment method can be achieved by introducing the developed technology of structural agglomeration of the charge entering the granulation plants in turbo-blade agglomeration mixers of the TLA-080 brand without the use of structure-forming reagents.

**Keywords:** potassium chloride, agglomeration, granulation, agglomeration mixer, structure-forming reagent

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Olga M. Volchek* – Senior Lecturer at Baranovichi State University. E-mail: leolya07@mail.ru; *Viktor Ya. Prushak* – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Technical Director at Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production. E-mail: ipr@sipr.by

**Contribution of the authors:** *Olga M. Volchek* – research planning, development of research methodology, data collection and analysis and systematization, studies results generalization, writing and formatting of the text of the manuscript; *Viktor Ya. Prushak* – substantiation of the concept, discussion of the results of the investigations, editing the text of the manuscript.

**For citation:** Volchek O. M., Prushak V. Ya. Preparation of feedstock for potassium chloride granulation plants. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 293–302. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-293-302>

Received: 26.06.2023

Approved for publication: 30.11.2023

Signed to the press: 15.12.2023

**Введение.** Хлористый калий широко используется в мировом сельском хозяйстве в качестве калийного удобрения как для непосредственного внесения в почву, так и для производства сложных и смешанных удобрений [1]. Этот вид удобрения является самым экономически эффективным источником калия. Неслучайно на мировом рынке минеральных удобрений его доля составляет немногим менее 20 %. При этом особым спросом пользуется гранулированный хлористый калий, к физико-механическим и физико-химическим показателям которого предъявляются достаточно жесткие требования со стороны потребителей.

Одним из крупнейших в мире производителей гранулированного хлористого калия является ОАО «Беларуськалий», в составе которого работают четыре обогатительные фабрики (СОФ) как с флотационным способом обогащения силвинитовой руды (СОФ-1, СОФ-2, СОФ-3), так и с галургическим способом обогащения (СОФ-4). На этих фабриках для производства гранулированного продукта используется метод компактирования мелкозернистого продукта на валковых прессах с последующим дроблением, классификацией и облагораживанием гранул.

К важной составляющей технологического процесса получения гранулированного хлористого калия относится подготовка исходного обезвоженного продукта обогащения (далее шихта) к компактированию в валковых прессах, которая заключается в гомогенизации шихты по гранулометрическому составу (грансоставу) и влажности, а также в ее сушке и подогреве до необходимой температуры прессования. Согласно многочисленным исследованиям ([2–7], RU 2775769 С1

«Способ гранулирования флотационного хлористого калия» (авторы – В. З. Пойлов, М. В. Черепанова, А. С. Подтынова, А. В. Чернышев, опубл. 08.07.2022); RU 2359910 С2 «Способ получения влагостойкого хлористого калия с улучшенными реологическими свойствами» (авторы – Н. К. Андреева, Ю. В. Букша, В. А. Себалло, В. М. Кириенко, А. Д. Любушенко, М. М. Варавя, А. Р. Штайда, Н. В. Ганчар, А. В. Пастухов, опубл. 27.06.2009)), осуществляемые при этом изменения физико-механического и физико-химического состояния шихты могут оказывать значительное влияние на производительность установок прессования и на такие качественные показатели готового гранулированного продукта, как его механическая прочность, гигроскопичность и слеживаемость. При этом в упомянутых работах особо отмечается необходимость в процессе подготовки шихты совершенствования кристаллической структуры частиц хлористого калия путем их обработки в аппаратах-агломераторах в присутствии структурообразующих реагентов.

Многие результаты исследований были реализованы в ОАО «Беларуськалий» при совершенствовании технологических схем получения гранулированного хлористого калия, что способствовало повышению качества выпускаемого продукта. Вместе с тем необходимость дальнейшего повышения конкурентоспособности гранулированного хлористого калия в части снижения себестоимости производства и улучшения его прочностных и физико-химических характеристик потребовала проведения комплексного анализа существующих технологических схем подготовки шихты к компактированию на валковых прессах на предмет выработки рекомендаций по их совершенствованию.

Исследование проводилось в отделениях гранулирования хлористого калия всех четырех сильвинитовых обогатительных фабрик ОАО «Беларуськалий».

*Цель работы* – оценить уровень реализованных технологических решений в области подготовки исходного продукта к компактированию на валковых прессах, соответствие их выработанным теоретическим представлениям и рекомендациям; выявить проблемные места технологического процесса; выработать рекомендации по совершенствованию технологии и модернизации технологического оборудования.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Принципиальная технологическая схема подготовки шихты к прессованию на валковых прессах, применяемая при производстве гранулированного продукта на всех трех сильвинитовых обогатительных фабриках с флотационным методом обогащения (СОФ-1, СОФ-2, СОФ-3), приведена на рис. 1.

Видно, что процесс подготовки шихты осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит гомогенизация шихты по гранулометрическому составу и влажности, а также совершен-

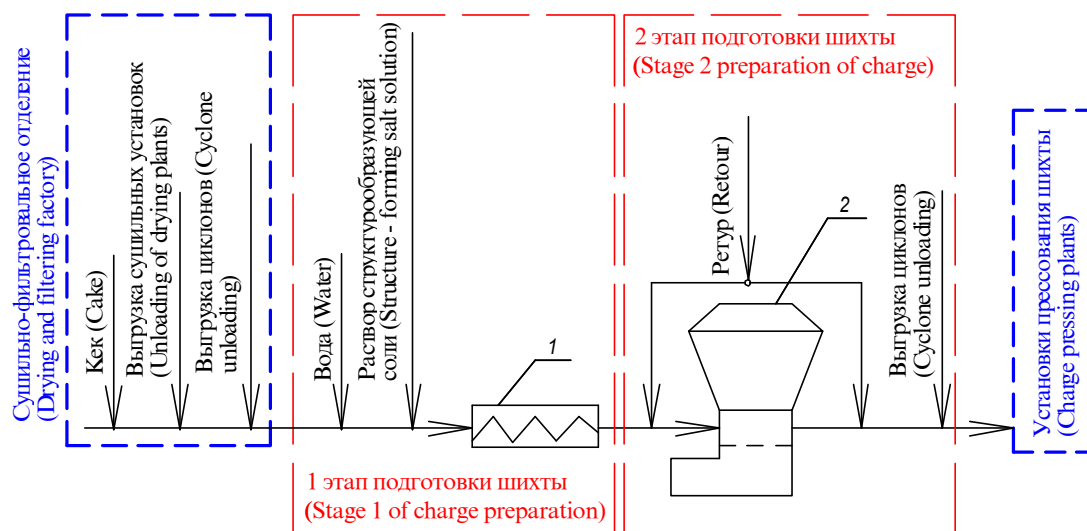


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема подготовки шихты к прессованию в отделениях гранулирования флотационных обогатительных фабрик: 1 – смеситель-агломератор; 2 – сушильная установка кипящего слоя

Fig. 1. Basic technological scheme of preparation of the charge for pressing in the granulation departments of flotation processing plants: 1 – agglomerator mixer; 2 – fluidized bed drying unit

ствование кристаллической структуры частиц путем их структурной агломерации в смесителях-агломераторах (СА). На втором этапе осуществляется сушка и подогрев шихты в печах кипящего слоя, при необходимости совместно с частицами потока гранулирования, полученными после классификации размола прессата (ретур).

Из сушильно-фильтровального отделения обогатительной фабрики в отделение гранулирования хлористого калия подается шихта, содержащая следующие продукты: обезвоженный в центрифугах или на вакуум-фильтрах кек концентрата хлористого калия, полученный в процессе флотационного обогащения сильвинитовой руды; выгрузка циклонов сухой очистки дымовых газов сушильных аппаратов и пневмокласификаторов, включающая сухие пылевые частицы продукта обогащения; выгрузка сушильных аппаратов в виде горячего мелкозернистого хлористого калия. Состав и соотношения указанных выше продуктов в шихте могут меняться в зависимости от таких производственных факторов, как: план выпуска гранулированного и мелкозернистого полуфабрикатов; уровень загрузки технологических секций; гранулометрические и физико-химические параметры продуктов обогащения, в том числе остаточное содержание флотореагентов, и др.

В табл. 1 представлены результаты исследования параметров шихты, поступающей в отделение гранулирования хлористого калия СОФ-1. Данные получены в условиях установившегося режима полной загрузки установок гранулирования. Следует отметить, что гранулометрический состав и влагосодержание шихты, поступающей на установки гранулирования СОФ-2 и СОФ-3, также сходны с представленными в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Параметры шихты, поступающей на установки гранулирования хлористого калия

Table 1. Parameters of the charge entering the potassium chloride granulation plants

| № пробы          | Массовая доля воды в шихте, % | Выход классов (%) при грансоставе шихты |        |        |        |         |        |        |         |
|------------------|-------------------------------|---|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
|                  |                               | 1,25 мм                                 | 1,0 мм | 0,8 мм | 0,5 мм | 0,25 мм | 0,2 мм | 0,1 мм | –0,1 мм |
| 1                | 4,1                           | 0,1                                     | 1,9    | 4,2    | 16,7   | 21,9    | 6,5    | 17,7   | 31,0    |
| 2                | 4,4                           | 0,3                                     | 2,0    | 4,1    | 16,9   | 23,7    | 8,8    | 28,1   | 16,2    |
| 3                | 4,5                           | 0,3                                     | 2,4    | 5,8    | 21,4   | 28,8    | 8,3    | 17,0   | 16,0    |
| 4                | 4,2                           | 0,4                                     | 2,5    | 5,0    | 21,0   | 27,3    | 7,5    | 18,7   | 17,6    |
| Среднее значение | 4,3                           | 0,3                                     | 2,2    | 4,8    | 19,0   | 25,4    | 7,8    | 20,4   | 20,2    |

Поступающая шихта при необходимости увлажняется водой, чтобы ее влагосодержание было в пределах 4–5 %, и подается на обработку в СА. Вместе с шихтой в аппарат подается водный раствор структурообразующей соли, который дозируется пропорционально подаваемой на аппарат нагрузке в соответствии с утвержденными на предприятии нормами расхода. В СА происходит гомогенизация шихты по гранулометрическому составу и влажности, а также механоактивация частичек хлористого калия с предварительной структурной агломерацией путем пластической деформации увлажненной смеси. Согласно исследованиям [3, 5], без предварительной структурной агломерации материала, поступающего в установки прессования, этот процесс протекает в готовом грануляте, в результате чего при его хранении и транспортировке может разрушаться до 15–25 % гранул.

В процессе агломерации частиц в СА реализуется сложный физико-химический процесс рекристаллизации, чей дислокационный механизм обеспечивается прежде всего использованием минеральной структурообразующей соли, которая провоцирует образование дислокации в кристаллах КСl. При этом выбор структурообразующей соли обусловлен как ее физико-химическими, так и технико-экономическими характеристиками. Реализуемое в отделениях грануляции флотационных фабрик ОАО «Беларуськалий» технологическое решение предусматривает использование в качестве структурообразующей соли кальцинированной соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) в виде 10–15%-го водного раствора. Этот модификатор трансформирует хлориды кальция и магния в малорастворимые и менее гигроскопичные соединения: хлорид кальция превращается в карбонат кальция, а хлорид магния – в основные карбонаты магния различного состава. При этом,

как показано в [8], важно выдерживать правильную дозировку структурообразующего модификатора, соответствующую стехиометрии по отношению к хлоридам кальция и магния. Также следует отметить, что согласно [6], RU 2 359 910 C2 и результатам экспериментальных исследований в условиях флотационных фабрик, при влагосодержании шихты 4–5 % пластическая прочность достигает максимального значения. Как видно из табл. 1, именно такое оптимальное влагосодержание поступающей шихты поддерживается в реальных условиях производства.

В табл. 2 представлены результаты изучения работы двух линий обработки шихты в аппаратах СА в условиях СОФ-1, в которые подавался раствор кальцинированной соды в соответствии с установленными на предприятии нормами. Из таблицы видно, что реальный расход соды в пересчете на сухое вещество составляет около 2 кг/т готового гранулированного продукта. Вместе с тем, как указывалось в [8], наибольший гидрофобизирующий эффект наблюдается при удельных расходах модификаторов, соответствующих стехиометрии по отношению к хлоридам кальция и магния, а избыток карбоната натрия снижает качество готовых гранул. Во время проведения исследований содержание в шихте ионов кальция и магния составляло:  $Ca^{2+} = 0,03$  мас.%,  $Mg^{2+} = 0,02$  мас.%. Согласно расчетам стехиометрии по отношению к хлоридам кальция и магния, оптимальная дозировка кальцинированной соды в этом случае должна была составлять 0,09 кг/т, в то время как фактически подавалось около 0,2 кг/т. То есть при регламентном расходе модификатора происходит значительный его перерасход, что приводит к избыточному загрязнению готовой продукции карбонатом натрия по сравнению с вариантом дозировки вещества в количествах, точно соответствующих стехиометрии.

Т а б л и ц а 2. Параметры работы смесителей-агломераторов

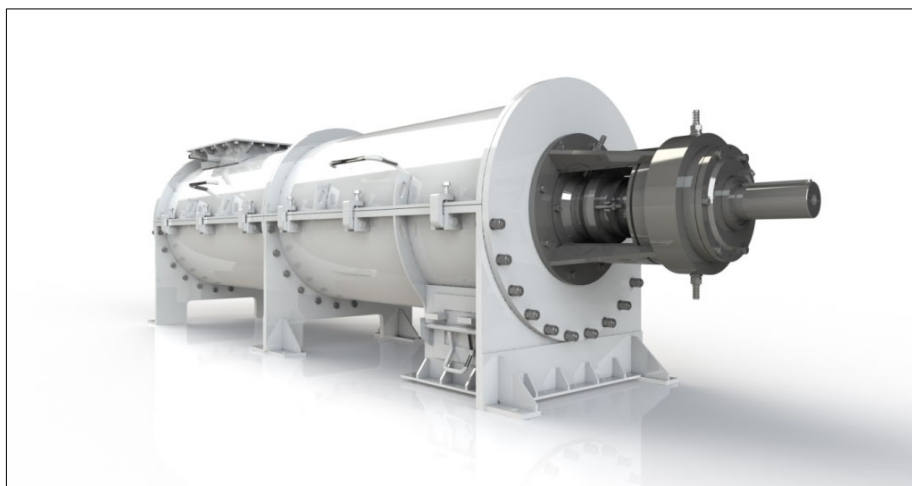
Table 2. Parameters of operation of agglomerator mixers

| СА-1          |             |      | СА-2          |             |      | Выход гранул, т/ч | Массовая доля КСI в гранулах, % | Расход соды, г/т гранул | Концентрация содового раствора, % |
|---------------|-------------|------|---------------|-------------|------|-------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Нагрузка, т/ч | Расход соды |      | Нагрузка, т/ч | Расход соды |      |                   |                                 |                         |                                   |
|               | л/ч         | г/т  |               | л/ч         | г/т  |                   |                                 |                         |                                   |
| 98            | 1276        | 1982 | 43            | 557         | 1972 | 111               | 95                              | 2514                    | 13,47                             |
| 72            | 883         | 1867 | 80            | 1109        | 2110 | 153               | 95,3                            | 1975                    |                                   |
| 86            | 1205        | 2133 | 96            | 1356        | 2150 | 185               | 95,5                            | 2096                    |                                   |
| 77            | 1093        | 2161 | 112           | 1572        | 2136 | 199               | 95,5                            | 2028                    |                                   |
| 83            | 1121        | 2050 | 83            | 1007        | 1853 | 162               | 95,3                            | 1994                    |                                   |

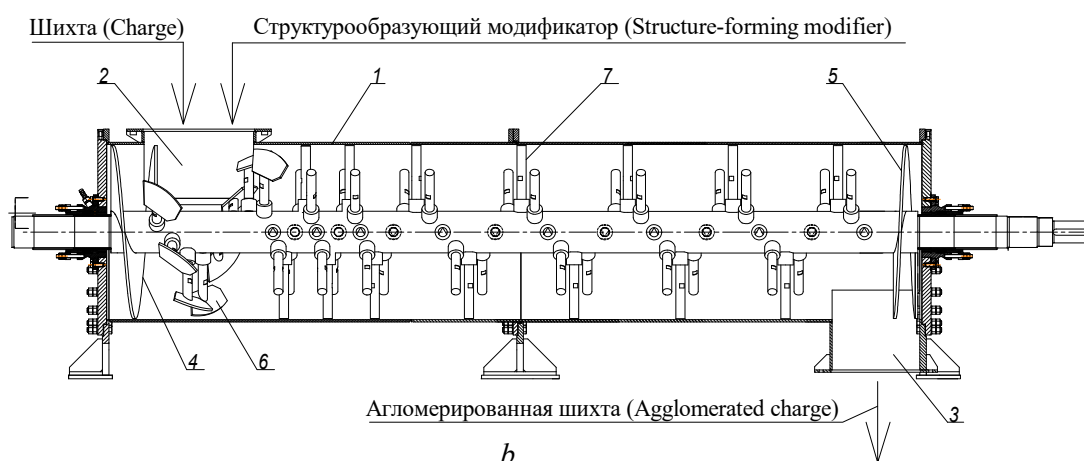
Изучение организационно-технических обстоятельств использования указанного режима обработки питания грануляции позволило сделать вывод, что одной из причин такого решения явилась необходимость компенсации технического несовершенства используемых СА, в которых недостаточно эффективно осуществляются процессы гомогенизации шихты по гранулометрическому составу и влажности, и агломерации частиц хлористого калия.

Для решения проблемы было предложено заменить существующие аппараты-агломераторы модернизированными турболопастными смесителями-агломераторами, технические характеристики которых будут обеспечивать необходимые для качественной агломерации условия обработки материала: плотность потока шихты до 500 т/(ч·м<sup>2</sup>), продолжительность времени нахождения шихты в аппарате не менее 20 с при высокоинтенсивном механическом воздействии перемешивающих элементов на частицы. В связи с тем что отечественная промышленность не выпускает аппараты, удовлетворяющие указанным требованиям, нами была выполнена разработка конструктивно нового аппарата – горизонтального турболопастного смесителя-агломератора ТЛА-080 (рис. 2), выпуск которого налажен в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

Отличительной особенностью этого аппарата является удлиненный до 3,8 м цилиндрический корпус диаметром 800 мм, в котором размещены перемешивающие элементы трех типов – шнековые, лопаточные и стержневые, закрепленные на валу с переменным шагом. В аппарате при полной загрузке создается высокое и равномерное энергетическое поле, обеспечивающее



a



b

Рис. 2. Турболопастной смеситель-агломератор ТЛА-080: *a* – внешний вид; *b* – чертеж продольного разреза (*1* – корпус; *2* – загрузочная точка; *3* – разгрузочная точка; *4, 5* – шнековые перемешивающие элементы; *6* – лопаточные перемешивающие элементы; *7* – стержневые перемешивающие элементы)

Fig. 2. Turbo-blade agglomerator mixer TLA-080: *a* – appearance; *b* – drawing of the longitudinal section (*1* – housing; *2* – loading heat; *3* – unloading heat; *4, 5* – screw mixing elements; *6* – shovel mixing elements; *7* – rod mixing elements)

эффективную гомогенизацию по гранулометрическому составу и влажности, и формируются механоактивированные поверхности с высокой степенью межмолекулярного сцепления частиц шихты между собой.

Полученная в процессе структурной агломерации в СА влажная агломерированная шихта, в которой частицы фракции  $-0,1$  мм укрупнились до фракции  $+0,1$  мм, с добавлением (при необходимости подогрева) частиц ретуря подается в сушильные установки кипящего слоя, где обезвоживается до содержания влаги не более  $0,2$  % массовой доли воды, с нагревом материала до температуры прессования. При этом происходит кристаллизация пропитывающего раствора между частицами с образованием кристаллических мостиков, превращение образовавшихся в СА жидкофазных контактов сцепления между отдельными частицами в прочные фазовые контакты. Выполненный гидролиз солянокислых аминов в СА приводит к ускорению их термодесорбции и отгонки с поверхности кристаллов хлорида калия. В результате улучшается механическая агломерация пылевидных частиц, в том числе перенос тонкодисперсного хлорида калия на более крупные частицы, что приводит к укрупнению агломератов. При этом установлено, что для осуществления процессов частичной термодеструкции остаточных аминов и их термодесорбции с поверхности частиц хлористого калия желательнее нагревать шихту до температуры  $120$ – $130$  °С.

Условия подготовки шихты к прессованию галургического хлористого калия на СОФ-4 существенно отличаются от условий подготовки шихты на флотационных фабриках, описанных выше. Важнейшим отличием является то, что на галургической фабрике в соответствии с технологической схемой на сушилку кипящего слоя подается обезвоженный продукт непосредственно с центрифуг отделения фильтрации и центрифугирования, без предварительной гомогенизации шихты по грансоставу и влажности и без проведения операции совершенствования ее кристаллической структуры. То есть исключен обязательный для флотационных фабрик первый этап подготовки шихты перед прессованием. При этом обезвоженные частицы галургического хлористого калия, полученные путем вакуум-кристаллизации из раствора, имеют, как и частицы флотационного хлористого калия, неправильную форму, которая существенно отличается от равновесной кубической. Аналогичную форму имеют и мелкие частицы внутреннего потока гранулирования (ретур), полученные в результате прессования, размола и классификации прес-сата. Следовательно, как уже указывалось, поверхностная энергия частиц галургического происхождения, так же как и флотационного, является избыточной, система обладает высокой сорбционной способностью и способна к агломерации кристаллов с образованием частиц с минимальной поверхностной энергией. Соответственно, без предварительной структурной агломерации шихты этот процесс протекает в готовом грануляте. Неслучайно физико-механические свойства гранулированного продукта галургического происхождения уступают аналогичным показателям продукта флотационного происхождения.

Согласно результатам исследования гранулометрического состава готовых гранул, приведенным в табл. 3, в продукте галургической обогатительной фабрики СОФ-4 при меньшем значении содержания частиц фракции 1–2 мм больше частиц фракций менее 1 мм, что указывает на недостаточную прочность гранул. Кроме того, на низкую прочность гранул указывает их интенсивное разрушение в сухогрузах при морской транспортировке в отличие от гранул флотационных фабрик, которые переносят транспортировку без потери качества.

Таблица 3. Гранулометрический состав гранулированного хлористого калия на флотационных и галургической фабриках

Table 3. Granulometric composition of granulated potassium chloride at flotation and halurgical factories

| Класс крупности, мм   | Массовая доля фракций, % |       |       |       |
|-----------------------|--------------------------|-------|-------|-------|
|                       | СОФ-1                    | СОФ-2 | СОФ-3 | СОФ-4 |
| Более 4               | 3,8                      | 4,0   | 3,3   | 1,6   |
| От 2 до 4             | 90,5                     | 90,8  | 91,1  | 93,6  |
| От 1 до 2             | 5,1                      | 4,6   | 5,0   | 3,9   |
| Менее 1               | 0,6                      | 0,6   | 0,6   | 0,9   |
| В том числе менее 0,5 | 0,3                      | 0,3   | 0,3   | 0,4   |

В связи с выявленными недостатками нами была исследована возможность и целесообразность внедрения технологической операции структурной агломерации шихты, поступающей на установки гранулирования СОФ-4.

Анализ опыта эксплуатации СА при переработке обезвоженного галургического мелкого хлористого калия в условиях СОФ-4 в процессе укрупнения мелкодисперсных фракций для получения обеспыленного продукта показал, что имеет место быстрое залипание аппарата при содержании влаги в продукте выше 4 %, в отличие от вариантов аналогичной переработки мелкого флотационного продукта в СА, для которых содержание влаги даже 6–7 % не является критичным. В настоящее время массовая доля воды в шихте, поступающей в сушильные установки кипящего слоя, составляет 5,0–5,5 мас.%. Снизить ее до менее 4,0 мас.% с тем, чтобы производить агломерацию в СА с использованием водного раствора минеральной структурообразующей соли при существующей технологической схеме, невозможно. Кроме того, получаемый в настоящее время галургический гранулированный продукт обладает одним несомненным достоинством – он, в отличие от гранулированного продукта флотационного происхождения,

не загрязнен структурирующими добавками, которых при обработке галургической шихты потребуется существенно больше вследствие более высокого содержания ионов магния (в среднем  $Mg^{2+} = 0,046$  мас.%). В связи с этим представляется перспективным реализовать подход, предложенный в RU 2422363 C1 «Способ получения гранулированного хлористого калия» (авторы – Н. К. Андреева, Ю. С. Сафрыгин, В. И. Тимофеев, Ю. В. Букша, Г. В. Осипова; опубл. 27.06.2011) применительно к условиям гранулирования мелкого хлористого калия Верхнекамского месторождения калийных солей. Данный подход предусматривает агломерацию частиц хлористого калия в СА без использования раствора структурообразующей соли в условиях высокой нагрузки на аппарат и времени обработки продукта не менее 15 с при влажности 1,0–2,8 %. Согласно результатам исследования эффект структурной агломерации материала может быть достигнут путем интенсивной механической обработки в аппарате-агломераторе влажного кека совместно с мелкими классами частиц ретура. При этом происходит принудительная упаковка полидисперсного материала, механическое выравнивание поверхности отфильтрованного концентрата и частиц потока гранулирования, устранение дефектов кристаллов и частиц за счет их обволакивания мелкодисперсным продуктом, образующимся при истирании полидисперсных частиц. Влажность гомогенизированной шихты в СА определяется соотношением поступающего обезвоженного продукта и ретура.

Согласно выполненным исследованиям в условиях СОФ-4 содержание воды в шихте, состоящей из кека концентрата и частиц ретура, в процессе совершенствования ее кристаллической структуры в СА должно находиться в пределах 3–4 мас.%. Содержание воды в шихте менее 3 мас.% недостаточно для эффективной агломерации. Содержание воды в шихте более 4 мас.% создает опасность залипания СА с соответствующей остановкой производственной линии. При этом наиболее эффективным аппаратом для успешного агломерирования по предложенному способу является разработанный турболопастной смеситель-агломератор ТЛА-080, технические характеристики которого обеспечивают необходимые время и интенсивность механического воздействия на частицы шихты. Для реализации этого предложения потребуется относительно небольшая реконструкция существующих технологических линий – устройство дополнительных конвейерных линий и двухрукавных течек с управляемыми клапанами в системе циркуляции ретура, для обеспечения оптимальной плотности потока шихты и температуры агломерации в пределах 60–80 °С путем поддержания в автоматическом режиме необходимого объема и соотношения продуктов, поступающих в СА.

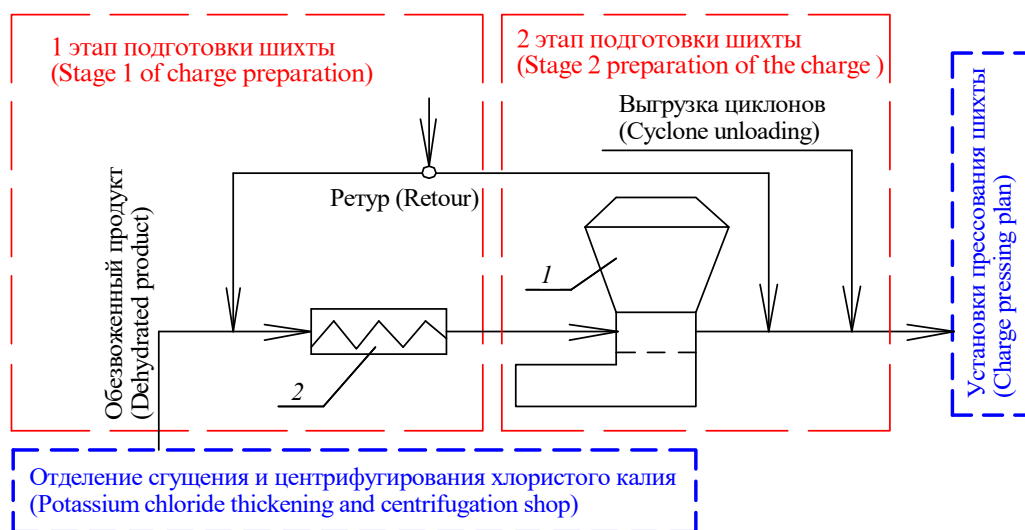


Рис. 3. Предлагаемая принципиальная технологическая схема подготовки шихты к прессованию на участке гранулирования галургической обогатительной фабрики: 1 – сушильные установки кипящего слоя; 2 – турболопастной смеситель-агломератор

Fig. 3. The proposed basic technological scheme for preparing the charge for pressing at the pelletizing site of the galurgical processing plant: 1 – fluidized bed drying plants; 2 – turbo-blade agglomerator mixer



На рис. 3 представлена предлагаемая технологическая схема двухэтапной подготовки шихты в условиях СОФ-4. Ожидается, что внедрение предложенной схемы повысит гидрофобизацию и статическую прочность готовых гранул на 8–12 %.

**Заключение.** Выполнена оценка существующих технологических схем и аппаратного обеспечения процесса подготовки исходного питания установок гранулирования хлористого калия сильвинитовых обогатительных фабрик ОАО «Беларуськалий».

Установлено, что в отделениях грануляции фабрик с флотационным методом обогащения на этапе гомогенизации шихты по грансоставу и влажности и совершенствования кристаллической структуры процесс агломерации частиц происходит недостаточно эффективно вследствие технического несовершенства используемых аппаратов-агломераторов. При этом имеет место значительный перерасход структурообразующего модификатора по сравнению с количеством, рассчитанным согласно стехиометрии по отношению к хлоридам кальция и магния, что приводит к избыточному загрязнению готовой продукции карбонатом натрия. Для устранения выявленных недостатков предложено использовать в качестве аппаратов-агломераторов разработанный авторами оригинальный турболопастной смеситель-агломератор, предназначенный для обработки мелких частиц хлористого калия в равномерном высокоэнергетическом поле потока материала высокой плотности, способного обеспечить получение механоактивированных поверхностей обрабатываемых частиц с высокой степенью их межмолекулярного сцепления между собой, достаточного для качественной структурной агломерации продукта. Производство этого аппарата под маркой ТЛА-080 налажено в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». Внедрение разработанного аппарата позволяет также снизить расход структурообразующего модификатора в соответствии с научно обоснованными нормами.

Для осуществления процессов термодеструкции остаточных аминов и их термодесорбции с поверхности частиц шихты хлористого калия и эффективного завершения процесса агломерирования частиц целесообразно осуществлять сушку шихты в печах кипящего слоя с нагревом продукта до температуры 120–130 °С.

Повышение физико-механических и физико-химических характеристик галургического гранулированного хлористого калия может быть обеспечено путем внедрения разработанной технологической схемы структурной агломерации обезвоженного хлористого калия совместно с мелкими классами частиц ретурра без добавления структурообразующих модификаторов при влажности шихты в пределах 3–4 мас.%. В качестве агломерирующих аппаратов целесообразно использовать разработанные турболопастные смесители-агломераторы марки ТЛА-080.

#### Список использованных источников

1. Gebreslassie, H. B. Effect of Potassium Fertilizer on Crop Production / H. B. Gebreslassie // J. Nat. Sci. Res. – 2016. – Vol. 6, № 7. – P. 81–86.
2. Дихтиевская, Л. В. Разработка технологии получения гранулированных калийных удобрений с улучшенными физико-химическими и механическими свойствами / Л. В. Дихтиевская, В. В. Шевчук, Н. П. Крутько // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2010. – Т. 54, № 6 – С. 57–61.
3. Физико-механические свойства гранулированного хлористого калия / З. Л. Козел [и др.] // Актуальные вопросы добычи и переработки природных солей: сб. науч. трудов ЗАО «ВНИИ галургии» / под ред. Ю. В. Букши. – СПб.: НИИЗК СПбГУ, 2006. – С. 181–195.
4. Казаков, А. И. Технологические возможности турболопастных смесителей-грануляторов / А. И. Казаков // Хим. пром-сть. – 2001. – Т. 28, № 6. – С. 35–38.
5. Сабиров, Р. Р. Изучение прочностных свойств гранулированных калийных удобрений / Р. Р. Сабиров, Г. П. Игнатьева, В. А. Себалло // Обогащение руд. – 2005. – № 3. – С. 11–13.
6. Сабиров, Р. Р. Разработка технологии и оборудования комплектной установки производства гранулированного КС1 методом прессования / Р. Р. Сабиров, В. А. Себалло, Н. М. Винников // Актуальные вопросы добычи и переработки природных солей: сб. науч. трудов ЗАО «ВНИИ галургии» / под ред. Ю. В. Букши. – СПб.: НИИЗК СПбГУ, 2006. – С. 195–203.
7. Исследование процесса агломерации пылевидного галургического хлорида калия / М. В. Черепанова [и др.] // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 4. – С. 68–77. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/197>
8. Разработка технологий кондиционирования мелкодисперсного и гранулированного хлорида калия / В. В. Шевчук [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 288–298. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-288-298>

## References

1. Gebreslassie H. B. Effect of Potassium Fertilizer on Crop Production. *Journal of Natural Sciences Research*, 2016, vol. 6, no. 7, pp. 81–86.
2. Dikhtievskaya L. V., Shevchuk V. V., Krut'ko N. P. Development of technology for obtaining granular potash fertilizers with improved physico-chemical and mechanical properties. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 57–61 (in Russian).
3. Kozel Z. L., Rogozin M. D., Gojko N. A., Aliferova S. N. Physico-mechanical properties of granular potassium chloride. Buksha Yu. V. (ed.). *Aktual'nye voprosy dobychi i pererabotki prirodnykh solei: sbornik nauchnykh trudov ZAO «VNII galurgii»* [Actual Issues of Extraction and Processing of Natural Salts: Collection of Scientific Works of JSC "All-Russian Research Institute of Galurgy"]. St. Petersburg, Scientific Research Institute of the Earth's Crust of St. Petersburg State University, 2006, pp. 181–195 (in Russian).
4. Kazakov A. I. Technological capabilities of turbo-blade granulator mixers. *Khimicheskaya promyshlennost' = Industry & Chemistry*, 2001, vol. 28, no. 6, pp. 35–38 (in Russian).
5. Sabirov R. R., Ignat'eva G. P., Sebalov V. A. Study of strength properties of granular potash fertilizers. *Obogashchenie Rud* [Ore Dressing], 2005, no. 3, pp. 11–13 (in Russian).
6. Sabirov P. P., Sebalov V. A., Vinnikov N. M. Development of technology and equipment for a complete plant for the production of granular KCl by pressing. Buksha Yu. V. (ed.). *Aktual'nye voprosy dobychi i pererabotki prirodnykh solei: sbornik nauchnykh trudov ZAO «VNII galurgii»* [Actual Issues of Extraction and Processing of Natural Salts: Collection of Scientific Works of JSC "All-Russian Research Institute of Galurgy"]. St. Petersburg, Scientific Research Institute of the Earth's Crust of St. Petersburg State University, 2006, pp. 195–203 (in Russian).
7. Cherepanova M. V., Kuzina O. E., Poylov V. Z., Munin D. A. Research of pulverized halurgic potassium chloride agglomeration. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 68–77 (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/197>
8. Shevchuk V. V., Dikhtievskaya L. V., Shlomina L. F., Krutko N. P., Markin A. D. Development of conditioning technologies of fine-dispersed and granular potassium chloride. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 288–298 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-288-298>