

УДК 661.152.33:66.03

В. С. ФРАНЦКЕВИЧ¹, Н. А. ВЫСОЦКАЯ^{1,2}, А. П. ДВОРНИК³

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

²ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Солигорск, Беларусь

³Белорусский национальный технический университет, филиал г. Солигорск, Беларусь

ГРАНУЛИРОВАНИЕ СЛОЖНО-СМЕШАННЫХ УДОБРЕНИЙ В БАРАБАННОМ ГРАНУЛЯТОРЕ-СУШИЛКЕ

Рассматриваются особенности производства комплексных сложно-смешанных удобрений методом окатывания. Приведено описание работы барабанного гранулятора-сушилки (БГС). Представлена усовершенствованная математическая модель для определения среднего эквивалентного диаметра гранул на выходе БГС, учитывающая механику качения гранулы по частице порошка.

Ключевые слова: гранулирование, окатывание, удобрение, ретур, барабанный гранулятор.

Во многих отраслях промышленности и в сельском хозяйстве широкое применение получили гранулированные материалы, например удобрения. К ним предъявляются различные требования по гранулометрическому составу, прочности, теплопроводности, влагопотребности и др., разработано большое количество способов и оборудования для их производства [1].

Для изготовления гранулированных удобрений используется гранулирование – это совокупность физико-химических и физико-механических процессов, обеспечивающих получение частиц определенной формы, размеров и прочности, которые сопровождаются уплотнением структуры вещества, причем существенное влияние на свойства получаемого продукта оказывает взаимодействие связующих с компонентами тукосмеси. В ходе такого взаимодействия возможно образование новых фаз и кристаллических соединений, которые могут повысить эффективность гранулирования и улучшить качество получаемого продукта [2, 3]. При гранулировании тонкодисперсных порошков в качестве связующих используют различные вещества, отличающиеся своей природой и свойствами [4–6]. Установление характеристик взаимодействия раствора связующего с компонентами тукосмеси при формировании гранул минеральных удобрений является сложной задачей, поскольку в процессе гранулирования и сушки на поверхности и внутри гранул происходит образование новых фаз и кристаллических соединений, которые рентгеноаморфны и не поддаются анализу [7].

Комплексные удобрения в ОАО «Беларуськалий» производятся с 2010 г., когда была введена в эксплуатацию тукосмесительная установка проектной мощностью 100 тыс. тонн в год. В 2013 году приступил к работе цех мощностью 240 тыс. тонн в год по выпуску комплексных азотно-фосфорно-

калийных (NPK) минеральных удобрений, которые содержат все основные питательные элементы, обеспечивающие сбалансированное питание растений [8]. Для их выпуска используется инновационная технология паровой грануляции, позволяющая получать в одной грануле продукт с требуемым соотношением трех основных компонентов. При такой технологии полностью отсутствуют твердые и жидкие отходы, а выбросы в атмосферу сведены до минимума. Кроме того, данный метод дает возможность применения при производстве удобрений полуфабрикатов обогатительной фабрики, что благоприятно сказывается на себестоимости продукции.

Технологический процесс производства сложно-смешанных минеральных удобрений методом паровой грануляции предполагает применение окатывания, которое объединяет группу процессов, связанных с перемещением гранулируемого порошка по поверхности аппарата, и включает четыре стадии [9]:

- смешивание исходного порошка с частицами ретура (мелкой фракции готового продукта, предназначенной для поддержания оптимальной влажности и обеспечения максимального выхода товарной фракции) и связующим;
- образование гранул из мелких частиц и дробление комков;
- окатывание и уплотнение гранул в ходе перемещения по поверхности аппарата;
- стабилизацию структуры гранул путем упрочнения связей в результате перехода жидкой фазы в твердую.

На всех названных стадиях происходит образование частиц разных размеров, причем их гранулометрический состав зависит от свойств продукта, технологии, аппаратурного оформления процесса гранулирования и др.

В работе [10] предложен метод расчета параметров технологического процесса получения NPK-удобрений методом окатывания, а также оборудования, необходимого для его реализации. Рассмотренный подход основан на использовании экспериментально полученных зависимостей, которые для сложно-смешанных удобрений значительно отличаются при разных условиях проведения испытаний, из-за чего авторами литературных источников рекомендуются существенно различающиеся значения одних и тех же расчетных коэффициентов. В связи с этим актуальна разработка математических моделей, более полно учитывающих особенности технологических процессов производства сложно-смешанных минеральных удобрений.

Высокую эффективность при гранулировании удобрений показывает широко используемый в настоящее время барабанный гранулятор-сушилка (БГС), который представляет собой вращающийся барабан с внутренней подъемно-лопастной насадкой, установленный с наклоном к горизонту в сторону выгрузки под углом от 1 до 3° (рисунок 1). Этот угол определяет производительность барабана-гранулятора, причем его оптимальное значение устанавливается экспериментально для конкретного гранулометрического состава продукта. При вращении барабана лопатки специального профиля, установленные внутри барабана, проходят через слой продукта в нижней

части («завал»), захватывая его и затем ссыпая, образуя при этом «завесу» по всему сечению. На эту завесу с помощью форсунки наносится перерабатываемая пульпа, диспергируемая с помощью сжатого воздуха (или за счет образующегося пара при работе с трубчатым реактором). В головную часть барабана также подают топочные газы и вводят внешний ретур, для перемещения которого в зону образования завесы головная часть БГС оснащена винтовой насадкой. При нанесении пульпы на частицы завесы происходит образование гранул, которые затем досушиваются. Максимальное количество пульпы, подаваемое на завесу, зависит от предельной влажности гранул, при которой начинается образование агломератов в «завале».

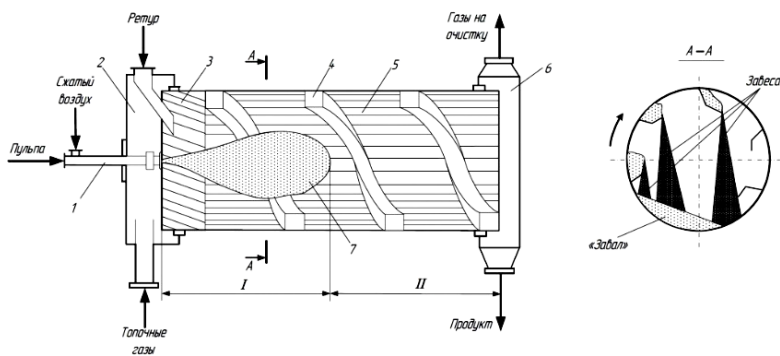


Рисунок 1 – Барабанный гранулятор-сушилка (БГС)

- 1 – форсунка; 2 – загрузочная камера; 3 – винтовая питающая насадка; 4 – обратный шнек;
 5 – подъемно-лопастная насадка; 6 – разгрузочная камера; 7 – факел;
 I – зона гранулирования; II – зона досушки

В барабане-грануляторе происходит окатывание исходной шихты, после чего отгранулированная шихта поступает на досушку, а затем, при помощи транспортирующих механизмов, в барабан-холодильник, после чего элеватором доставляется в грохот. Крупную фракцию измельчают в дробилке. Дробленый материал вместе с мелкой фракцией в качестве ретура возвращают в технологический процесс, а готовый продукт обрабатывается в барабане-кондиционере антислеживателем [11, 12].

Отличительной особенностью аппаратов БГС является наличие обратного шнека, позволяющего возвращать некоторое количество гранулированного материала в головную часть аппарата. В связи с этим существуют технологические схемы, не предполагающие использование внешнего ретура. В них крупная фракция после рассева поступает на дробление и затем возвращается на повторный рассев, а мелкая подается в БГС на обратный шнек. Но это решение не является наилучшим как по производительности, так и с точки зрения стабилизации технологии и качества продукта. Опытным путем установлено, что только сочетание внешнего и внутреннего ретуров является оптимальным при использовании рассматриваемого аппарата [13, 14].

Достоинствами гранулирования в БГС являются высокая интенсивность тепло- и массообмена, небольшая кратность внешнего рецикла (1–2), хорошее качество и узкий гранулометрический состав готового продукта, возможность автоматизации процесса.

В ходе работы БГС происходят колебания гранулометрического состава, которые приводят к изменениям производительности аппарата, диаметра гранул на выходе, а также к нарушениям регламентных требований по их прочности и влажности. Для стабилизации процессов гранулирования и сушки, а также получения требуемых качественных показателей продукта необходимо поддерживать определенный расход и качество внешнего ретура [15–18].

В связи с этим в работе [19] предложена математическая модель, позволяющая рассчитать зависимость среднего эквивалентного диаметра гранул аммофоса на выходе БГС от эквивалентного диаметра гранул внешнего ретура и его расхода. Ее входными параметрами являются: измеряемые непрерывно расход внешнего ретура $G_{\text{рет}}^{\text{внут}}$ и пульпы $F_{\text{пул}}$, плотность пульпы $\gamma_{\text{пул}}$ (контролируется в лаборатории 1 раз в час), а также средний диаметр гранул внешнего ретура $d_{\text{внеш}}$, который измеряется гранулометром каждые 5 минут. Выходной параметр модели – средний эквивалентный диаметр $d_{\text{вых}}$ гранул на выходе из барабана, который в настоящее время определяется по результатам просеивания гранул на ситах с разными размерами ячеек 1 раз в час.

Объемный расход, влажность и плотность потока пульпы позволяют оценить весовой расход $G_{\text{ам}}$ аммофоса, который формируется из пульпы, поступающей в БГС,

$$G_{\text{ам}} = F_{\text{пул}} \gamma_{\text{пул}} (1 - \omega_{\text{пул}}),$$

где $\omega_{\text{пул}}$ – влажность пульпы.

Средний эквивалентный диаметр $d_{\text{рет}}$ гранул суммарного потока $G_{\text{рет}} = G_{\text{рет}}^{\text{внеш}} + G_{\text{рет}}^{\text{внут}}$, включающего как внешний, так и внутренний ретур.

$$d_{\text{рет}} = \frac{d_{\text{внеш}} G_{\text{рет}}^{\text{внеш}} + d_{\text{внут}} G_{\text{рет}}^{\text{внут}}}{G_{\text{рет}}^{\text{внеш}} + G_{\text{рет}}^{\text{внут}}}.$$

Здесь $d_{\text{внут}}$ – промежуточная переменная, за которую можно принять результат последнего измерения $d_{\text{вых}}$.

Объем $V_{1,\text{рет}}$ одной гранулы ретура с учетом её сферической формы, а также количество $n_{\text{рет}}$ гранул, поступающих в БГС с потоком ретура, определяется выражениями

$$V_{1,\text{рет}} = \frac{1}{6} \pi d_{\text{рет}}^3; \quad n_{\text{рет}} = \frac{G_{\text{рет}}}{V_{1,\text{рет}} \gamma_{\text{ам}}} = \frac{6G_{\text{рет}}}{\pi d_{\text{рет}}^3 \gamma_{\text{ам}}},$$

где $\gamma_{\text{ам}}$ – удельный вес аммофоса.

На одну гранулу ретура за время однократного прохождения через зону загрузки БГС в среднем напыляется материал весом

$$\Delta G_{1,\text{рет}} = \frac{G_{\text{ам}}}{n_{\text{рет}}} = \frac{\pi G_{\text{ам}} d_{\text{рет}}^3 \gamma_{\text{ам}}}{6 G_{\text{рет}}},$$

что приводит к увеличению объема гранулы на

$$V_{1,\text{рет}} = \frac{\Delta G_{1,\text{рет}}}{\gamma_{\text{ам}}} = \frac{\pi G_{\text{ам}} d_{\text{рет}}^3}{6 G_{\text{рет}}}.$$

Новый (полученный) средний объем гранулы $V_{1,\text{нов}}$ и её новый диаметр $d_{\text{вых.уст}}$ после прохождения зоны загрузки согласно [18, 19]:

$$V_{1,\text{нов}} = V_{1,\text{рет}} + \Delta V_{1,\text{рет}} = \frac{1}{6} \pi d_{\text{рет}}^3 \left(1 + \frac{G_{\text{ам}}}{G_{\text{рет}}} \right); \quad d_{\text{вых.уст}} = d_{\text{рет}} \sqrt[3]{\frac{G_{\text{ам}} + G_{\text{рет}}}{G_{\text{рет}}}}.$$

Нахождение нового объема гранулы можно также осуществить на основе механического расчета. Определим, при каких размерах мелких частиц материала они могут быть захвачены перекатывающимися по ним гранулами. Для этого воспользуемся методикой, описанной в [20, 21]. При окатывании

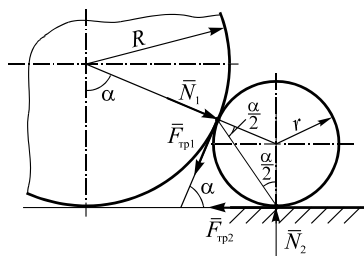


Рисунок 2 – Схема перекатывания гранулы через частицу

частицы перекатываются как по стенкам аппарата, так и друг по другу. Рассмотрим перекатывание гранулы с радиусом R через частицу, имеющую радиус r (рисунок 2). С целью упрощения расчета принимаем, что обе гранулы имеют сферическую форму. Учитывая, что сила тяжести частицы во много раз меньше сил взаимодействия между рассматриваемыми телами, ей пренебрегаем. Таким образом, принимаем во внимание только нормальные реакции N_1 , N_2 и силы трения $F_{\text{тр}1}$ и $F_{\text{тр}2}$.

Из суммы моментов относительно центра частицы получаем, что одинаковы силы трения $F_{\text{тр}1} = F_{\text{тр}2}$, а из суммы моментов относительно точки пересечения линий действия сил трения – $N_1 = N_2$. Проецируя силы на ось, перпендикулярную линии, соединяющей точки контакта частицы с гранулой и основанием, находим

$$N_1 \sin \frac{\alpha}{2} = F_{\text{тр}1} \cos \frac{\alpha}{2}; \quad N_2 \sin \frac{\alpha}{2} = F_{\text{тр}2} \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Отсюда

$$\text{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{F_{\text{тр}1}}{N_1} = \frac{F_{\text{тр}2}}{N_2}.$$

Учитывая, что $F_{\text{тр1 max}} = f_1 N_1$ и $F_{\text{тр2 max}} = f_2 N_2$, где f_1 и f_2 – коэффициенты трения в соответствующих точках контакта, находим, что гранула не будет соскальзывать с частицы и перекатывается через нее при одновременном выполнении условий

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \leq \frac{F_{\text{тр1 max}}}{N_1} = f_1; \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \leq \frac{F_{\text{тр2 max}}}{N_2} = f_2,$$

то есть допустимое значение угла α определяется меньшим из двух коэффициентов трения: в областях взаимодействия с гранулой и основанием.

С другой стороны, из геометрии рассматриваемой системы следует, что

$$R = R \cos \alpha + r \cos \alpha + r;$$

$$\frac{R}{r} = k = \frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} = \operatorname{ctg}^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{f^2},$$

где $f = \min(f_1; f_2)$. Отметим, что полученное выражение отличается от приведенного в [21, формула (86)], где при преобразованиях допущена арифметическая ошибка.

Из выведенной формулы следует, например, что при коэффициентах трения $f = 0,2$ и $f = 0,3$ к гранулам радиуса 100 мкм могут присоединиться частицы с радиусами 4 и 9 мкм. Наличие неровностей на поверхности гранул приводит к тому, что размеры присоединяемых частиц могут оказаться несколько большими. При увеличении радиуса гранулы в 10 раз во столько же раз увеличивается максимальный размер присоединяемой частицы. Таким образом, происходит постепенное увеличение радиусов гранул.

Рассмотренные модели могут быть использованы в системе стабилизации режима грануляции в БГС при производстве различных сложно-смешанных удобрений, а не только аммофоса.

При анализе качества получаемых при окатывании гранул исследуется, в том числе, их прочность, которая характеризуется:

- истираемостью (соответствует доле порошковидной фракции, образующейся в результате трения при определенных условиях);
- пределом динамической прочности (определяется долей разрушенных гранул при их ударе о твердую поверхность);
- пределом статической прочности (равен напряжению, при котором происходит разрушение до 100 гранул определенной фракции при одноосном сжатии между двумя параллельными плоскостями [22]; для удобрений, содержащих КСl, испытания проводят на гранулах кубической формы с ребром размера 4 мм, полученных в строго стандартизированных условиях из увлажненной вязкопластичной пасты [23]).

Таким образом, процесс гранулирования сложно-смешанных минеральных удобрений методом окатывания на сегодняшний день еще недостаточно

изучен и имеет ряд несовершенств. Проблему улучшения качества минеральных удобрений следует решать в первую очередь за счет оптимизации технологического процесса путем детального его изучения на каждом этапе производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Шкарпеткин, Е. А.** Анализ методов получения гранул и средств их реализации / Е. А. Шкарпеткин // Наука и современность – 2010 : сб. матер. II Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : Сибпринт, 2010. – С. 378–383.

2 Способ получения гранулированного калийного удобрения: пат. 2357943 Рос. Федерация, МПК (2006.01) : С 05D 1/02 / Н. П. Крутько [и др.]; заявл. 18.06.2007 ; опубл. 10.06.2009. – Бюл. № 16. – 7 с.

3 **Черепанова, М. В.** Технология гранулирования циклонной пыли хлорида калия методом окатывания: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.01 / М. В. Черепанова. – СПб. : С.-Петерб. гос. технол. ин-т, 2013. – 182 с.

4 Основы проектирования химических производств / В. И. Косинцев [и др.]. – М. : Академкнига, 2010. – 371 с.

5 Гранулирование циклонной пыли хлорида калия методом окатывания / О. А. Федотова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 29–34.

6 **Кузьминых, К. Г.** Формирование гранулометрического состава хлорида калия в результате температурно-циклонной обработки пылевидных фракций / К. Г. Кузьминых, В. З. Пойлов // Химическая промышленность сегодня. – 2015. – № 5. – С. 7–15.

7 **Kudryavtsev, P. G.** Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries / P. G. Kudryavtsev // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2014. – Vol. 16, no. 2. – P. 147–170.

8 **Высоцкая, Н. А.** Влагосодержание шихты комплексных удобрений / Н. А. Высоцкая, В. С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 1. – С. 63–70.

9 **Классен, П. В.** Основы техники гранулирования / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – М. : Химия, 1982. – 272 с.

10 **Высоцкая, Н. А.** Особенности получения НРК-удобрений методом окатывания / Н. А. Высоцкая, В. С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 79–85.

11 **Прушак, В. Я.** Разработка и внедрение новой технологической линии по производству сложно-смешанных НРК-удобрений / В. Я. Прушак, И. М. Заяц, В. И. Новокшонова // XII Национальная конф. с междунар. участием по открытой и подводной добыче полезных ископаемых, Варна, 26–30 июня 2013 г. – Варна : Научно-технический союз по горному делу, геологии и металлургии, 2013. – С. 359–362.

12 **Высоцкая, Н. А.** Применение барабанных грануляторов для получения сложно-смешанных минеральных удобрений / Н. А. Высоцкая, В. С. Францкевич // Нефтехимия – 2021 : материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 224–228.

13 Технология гранулированного диаммонийфосфата из неконцентрированной экстракционной фосфорной кислоты / А. М. Норов [и др.] // Химическая технология. – 2011. – Т. 12, № 10. – С. 589–593.

14 **Норов, А. М.** Разработка технологии диаммонийфосфата из неконцентрированной экстракционной фосфорной кислоты с использованием барабанного гранулятора-сушилки : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.01 / А. М. Норов. – М. : Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева, 2014. – 130 с.

15 Разработка норм оптимального технологического режима производства гранулированного диаммонийфосфата из неконцентрированной фосфорной кислоты / А. М. Норов [и др.] // Химическая технология. – 2012. – Т. 13, № 11. – С. 641–647.

16 Исследование влияния режимов гранулирования на качество диаммонийфосфата / И. Г. Гришаев [и др.] // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии : тезисы докладов. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – Т. 3. – С. 14.

17 **Гришаев, И. Г.** Производительность барабанного гранулятора-сушилки и качество фосфатов аммония / И. Г. Гришаев, А. М. Норов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 5. – С. 22–23.

18 **Гришаев, И. Г.** Разработка конструкции барабанных грануляторов-сушилок для производства минеральных удобрений / И. Г. Гришаев // Труды НИУИФ. – М. : Научно-исследовательский ин-т по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я. В. Самойлова, 2009. – С. 154–158.

19 Математическая модель влияния внешнего ретурна на процесс гранулирования аммофоса в барабанном грануляторе-сушилке / Д. В. Криушин [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 2 (62). – Ст. 11. – 10 с.

20 **Tarjan, G.** Der Einfluß von Bewegungskräften auf die Granulation / G. Tarjan / Aufbereitungstechnik. – 1966. – Bd.7, Nr. 1. – S. 28–32.

21 Процессы гранулирования в промышленности / Н. Г. Вилесов [и др.]. – Киев : Техніка, 1975. – 192 с.

22 **Высоцкая, Н. А.** Основные физико-химические и структурно-механические свойства гранулированных минеральных удобрений / Н. А. Высоцкая // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 3. – С. 59–65.

23 **Высоцкая, Н. А.** Способы получения гранул хлорида калия методом окатывания / Н. А. Высоцкая, В. С. Францкевич // Актуальные вопросы машиноведения. – 2020. – Вып. 9. – С. 265–268.

V. S. FRANTSKEVICH¹, N. A. VYSOTSKAYA^{1,2}, A. P. DVORNIK³

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

²JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus

³Belarusian National Technical University, branch of Soligorsk, Belarus

GRANULATION OF COMPLEX-MIXED FERTILIZERS IN A DRUM GRANULATOR-DRYER

The features of the production of complex complex-mixed fertilizers by the pelleting method are considered. The description of the drum granulator-dryer (DGD) operation is given. An improved mathematical model is presented for determining the average equivalent diameter of the granules at the outlet of the DGD, taking into account the mechanics of granule rolling over the powder particle.

Keywords: granulation, pelletizing, fertilizer, retur, drum granulator.

Получено 29.11.2021