

УДК 661.152.3-047.58:622.788.36(476)

**Н.А. Высоцкая<sup>1</sup>, В.С. Францкевич<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,  
г. Солигорск, Беларусь<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ  
УДОБРЕНИЙ МЕТОДОМ ОКАТЫВАНИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ  
ПО ИХ ПОЛУЧЕНИЮ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

**Аннотация.** С целью получения гранул комплексных минеральных удобрений в лабораторных условиях в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» был изготовлен барабанный гранулятор. Пробное испытание было проведено в УО «Белорусский государственный технологический университет». В ОАО «Беларуськалий» был получен исходный материал: хлористый калий, сульфат аммония, аммофос. В статье представлены режимы работы лабораторного гранулятора, фотографии полученных гранул. Приведены методика определения гранулируемости хлорида калия и факторы, влияющие на характеристики гранул комплексных удобрений при гранулировании окатыванием в барабанном грануляторе. Представлен перечень наиболее часто встречающихся или возможных неисправностей барабанного гранулятора и пути их устранения. Гранулирование методом окатывания на движущейся поверхности включает в себя расчеты угла внутреннего трения для порошкообразных и гранулированных материалов; коэффициента сыпучести; коэффициента, отражающего отношение количества поднимающегося сыпучего материала к общему количеству материала; верхнего угла загрузки. Также отмечено, что процесс гранулирования сложно-смешанных минеральных удобрений на сегодняшний день еще недостаточно изучен и имеет ряд несовершенств.

**Ключевые слова:** комплексные удобрения, испытания, материал, гранула, барабанный гранулятор.

**N.A. Vysotskaya<sup>1</sup>, V.S. Frantskevich<sup>2</sup>**<sup>1</sup>JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus<sup>2</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus**MODELING THE PROCESS OF COMPLEX FERTILIZERS PRODUCING  
BY THE ROLLING METHOD AND CONDUCTING TESTS  
FOR THEIR PRODUCTION IN LABORATORY CONDITIONS**

**Abstract.** A drum granulator was made at JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production" in order to obtain granules of complex mineral fertilizers in laboratory conditions. A trial test was carried out at the Belarusian State Technological University. The initial material: potassium chloride, ammonium sulfate and ammophos, was obtained at JSC "Belaruskali". The article presents the operating modes of the laboratory granulator, photographs of the obtained granules. A method for determining the granulability of potassium chloride and factors affecting the characteristics of complex fertilizer granules during pelletizing by rolling in a drum granulator are presented. A list of the most common or possible malfunctions of a drum granulator and ways to eliminate them are presented. Pelletizing by rolling on a moving surface includes calculations of the angle of internal friction for powdered and granular materials; flowability coefficient; coefficient reflecting the ratio of the amount of rising bulk material to the total amount of material; upper loading angle. It is also noted that the process of pelletizing complexly mixed mineral fertilizers has not yet been sufficiently studied and has a number of imperfections.

**Keywords:** complex fertilizers, tests, material, granule, drum granulator.

### Введение

Большим спросом среди потребителей пользуются гранулированные минеральные удобрения, в состав которых входят азот, фосфор, калий. В настоящее время в химической промышленности получили широкое распространение процессы гранулирования тонкодисперсных порошков методом окатывания в барабанных грануляторах. На стадиях гранулирования происходит образование частиц разных размеров.

Немаловажными параметрами, характеризующими образование гранул в процессе гранулирования методом окатывания, являются: количество ретур (мелкой фракции); наличие жидкой фазы; время окатывания и температура. С уменьшением количества ретур увеличивается выход товарной фракции и прочность гранул, а также структура материала становится более плотной, что приводит к возрастанию прочности гранул. При формировании гранул, связующими выступают различные жидкости, способствующие сцеплению частиц. Сила капиллярного сцепления в объеме увлажненного сыпучего материала зависит от крупности зерен: с увеличением размера зерна сила капиллярного сцепления уменьшается. Большая чувствительность к содержанию жидкости в материале является основным недостатком гранулирования методом окатывания. Длительное окатывание приводит к разрушению товарной фракции и образованию гранул размером менее 2 мм. В свою очередь, увеличение температуры в процессе гранулирования приводит к увеличению прочности гранул.

### Проведение испытаний в лабораторных условиях

Для проведения испытаний по получению гранул комплексных калийных удобрений были разработаны чертежи барабанного гранулятора, который был изготовлен в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». Пробное испытание было проведено в УО «Белорусский государственный технологический университет».

Технические характеристики барабанного гранулятора, изготовленного для проведения испытаний, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики барабанного гранулятора, изготовленного для проведения испытаний

| Параметр                             | Значение |
|--------------------------------------|----------|
| Длина барабана, мм                   | 450      |
| Наружный диаметр, мм                 | 223      |
| Внутренний диаметр, мм               | 219      |
| Диаметр прорезиненного бандажа, мм   | 260      |
| Ширина прорезиненного бандажа, мм    | 60       |
| Диаметр крышки, мм                   | 219      |
| Диаметр отверстия в крышке, мм       | 50       |
| Наружный диаметр упора, мм           | 219      |
| Внутренний диаметр упора, мм         | 200      |
| Ширина упора, мм                     | 10       |
| Расстояние от конца упора до оси, мм | 3,5      |

Барабан выполнен из нержавеющей стали 08X18H10T, химический состав которой приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав стали 08X18H10T

| Содержание химических элементов, % |        |      |        |         |          |         |        |     |
|------------------------------------|--------|------|--------|---------|----------|---------|--------|-----|
| C                                  | Si     | Mn   | Ni     | S       | P        | Cr      | Cu     | Fe  |
| до 0,08                            | до 0,8 | до 2 | 9 – 11 | до 0,02 | до 0,035 | 17 – 19 | до 0,3 | ~65 |

Фото установки с разработанным и изготовленным барабаном в лаборатории БГТУ приведено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Фото установки в лаборатории БГТУ

В ОАО «Беларуськалий» был получен исходный материал для проведения испытаний: хлористый калий, сульфат аммония, аммофос. Технические требования к материалам представлены в таблицах 3 – 5.

Таблица 3 – Технические характеристики хлористого калия (KCl)

| <i>Физические свойства</i>      |               |
|---------------------------------|---------------|
| Молярная масса, г/моль          | 74,555        |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>    | 1,984         |
| <i>Термические свойства</i>     |               |
| Температура плавления, °C       | 776           |
| Температура кипения, °C         | 1407          |
| <i>Химические свойства</i>      |               |
| Растворимость в воде при 0 °C   | 28,1 г/100 мл |
| Растворимость в воде при 20 °C  | 34,0 г/100 мл |
| Растворимость в воде при 100 °C | 56,7 г/100 мл |



Таблица 4 – Технические характеристики сульфата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 

| <i>Физические свойства</i>     |               |
|--------------------------------|---------------|
| Молярная масса, г/моль         | 132,14052     |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>   | 1,769         |
| <i>Термические свойства</i>    |               |
| Температура плавления, °С      | 235-280       |
| Температура разложения, °С     | 218           |
| <i>Химические свойства</i>     |               |
| Растворимость в воде при 20 °С | 75,4 г/100 мл |

Таблица 5 – Технические характеристики аммофоса  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 

| <i>Физические свойства</i>     |             |
|--------------------------------|-------------|
| Молярная масса, г/моль         | 132,0562    |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>   | 0,85        |
| <i>Термические свойства</i>    |             |
| Температура плавления, °С      | 190         |
| <i>Химические свойства</i>     |             |
| Растворимость в воде при 20 °С | 37 г/100 мл |

*Режимы работы лабораторного барабанного гранулятора.* Одним из способов получения НРК-удобрений является гранулирование в барабанном грануляторе. Этот процесс мало изучен, т.к. для получения комплексных удобрений используется несколько питательных элементов [1].

При гранулировании в барабанном грануляторе коэффициент заполнения не должен превышать 25 %.

В ходе эксперимента были получены гранулы комплексных НРК-удобрений. Для этого в барабан было помещено ~300 г исходного материала, угол наклона барабана составил 1°–4°, частота вращения барабана – 20–40 об/мин, подача пара – 0,2–0,35 л/мин, температура подаваемого пара ~90 °С.

В результате проведения эксперимента были получены гранулы, изображенные на рисунке 2.



Рисунок 2 – Гранулы, полученные в результате гранулирования комплексных удобрений в лабораторных условиях

Для сравнения на рисунке 3 представлены НРК-удобрения, полученные методом окатывания на 3 СОФ ОАО «Беларуськалий».





Рисунок 3 – NPK-удобрения, полученные методом окатывания на 3 СОФ ОАО «Беларуськалий»

*Методика определения гранулируемости хлорида калия.* Гранулируемость – специфическое свойство дисперсных систем образовывать достаточно прочные агломераты в результате формирования фазовых контактов между частицами дисперсной фазы. Количественно она оценивается прочностью гранул кубической формы с ребром размера 4 мм, полученных в строго стандартизированных условиях из увлажненной, вязкопластичной пасты.

Сущность методики определения гранулируемости образцов KCl заключается в следующем: на поверхности пластины из текстолита размером 100×100 мм в специальные прорезы вставляют металлические полоски гребенчатой формы в двух взаимно перпендикулярных направлениях, так чтобы образовывались кубические ячейки с размером ребра 4 мм. Навеску порошкообразного образца смешивают в чашке с определенным количеством воды и пластифицируют растиранием и перемешиванием пестиком в течение 5 минут; при этом 0,1–0,5 % воды испаряется. Установлено, что за стандартное значение влажности пасты  $W_{11}$  при измерении гранулируемости образцов порошковидного KCl целесообразно принять  $W_{11} = 10\%$ . Полученную пасту вводят в матрицу так, чтобы над ее поверхностью возвышался ровный слой толщиной 2–3 мм, который накрывают металлической пластиной. Шихту в матрице уплотняют при помощи лабораторного гидравлического пресса при давлении 1,5 МПа в течение 5 минут. После уплотнения выступающий слой срезают ножом, а образец оставляют на воздухе или в сушильном шкафу при определенной температуре  $T_{\text{ф}}$  на 30 минут для формирования фазовых контактов и образования специфической кристаллической структуры. После этого гранулы извлекают из матрицы, образец досушивается до температуры 65–75 °С до постоянной массы и охлаждается в эксикаторе над водопоглотителями. Статическую прочность полученных кубических гранул принимают за величину гранулируемости  $G$ . Уплотнение пасты можно осуществлять и при другом давлении, учитывая, что  $G$  изменяется пропорционально давлению сжатия. В этом случае полученный результат соответственно пересчитывается: результат приводится к стандартной величине давления сжатия пасты (1,5 МПа).

При исследовании зависимости  $G$  от температуры гранулируемость образцов определяется следующим образом: пасту с влажностью 10 % вносят в кассету для формирования кубических гранул. Кассету плотно заворачивают и заклеивают в кальку, нагревают в сушильном шкафу в течение 30 минут. После чего образец сжимают в гидравлическом прессе при давлении 1,5 МПа в течение 5 минут и вновь помещают в сушильный шкаф на 30 минут при той же температуре. Затем кассету разворачивают, и полученные кубические гранулы досушивают при той же температуре в течение 30 ми-

нут, извлекают из кассеты. Охлаждают в эксикаторе до комнатной температуры в течение 25 минут и измеряют их статическую прочность. Каждый образец исследуется в двукратной повторности [2].

*Факторы, влияющие на характеристики гранул комплексных удобрений при гранулировании окатыванием в барабанном грануляторе.* К конструктивным параметрам барабана-гранулятора относятся: диаметр барабана-гранулятора, длина обечайки, высота борта, угол наклона [3].

К динамическим характеристикам процесса окатывания относятся: коэффициент заполнения, скорость вращения аппарата, время пребывания материала в аппарате, определяющие скорость и число соударений гранул.

Перечень наиболее часто встречающихся или возможных неисправностей барабанного гранулятора приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Перечень возможных неисправностей барабанного гранулятора

| Неисправности                                                                    | Вероятная причина                                                            | Методы устранения                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Проворачивание корпуса барабана в бандажах более 5 мм за 1 оборот                | Увеличенный зазор между бандажом и набором прокладок                         | Установить дополнительные прокладки под бандаж, при этом толстую прокладку обязательно ставить со стороны бандажа: вначале следует установить прокладки в 4-х диаметрально противоположных местах, а затем остальные |
| Износ опорных роликов до 10 мм по толщине обода                                  | Длительная эксплуатация                                                      | Равномерно сдвинуть ролики к середине опорной станции, проверить и отрегулировать зацепление открытой зубчатой передачи                                                                                              |
| Износ опорных роликов до 20 мм по толщине обода                                  | Длительная эксплуатация                                                      | Заменить ролики                                                                                                                                                                                                      |
| Износ роликов на конус, появление трещин и местной выработки с появлением реборд | Неправильная установка роликов                                               | Проточить поверхность роликов, переустановить ролики                                                                                                                                                                 |
| Износ бандажа более 30 мм по толщине                                             | Длительная эксплуатация                                                      | Заменить бандаж                                                                                                                                                                                                      |
| Ослабление болтовых соединений                                                   | Длительная эксплуатация, вибрация                                            | Затянуть болтовые соединения и установить контргайки                                                                                                                                                                 |
| Повышается вибрация привода и загрузчика шнекового, повышенный шум               | Расцентровка муфт, увеличенное радиальное и осевое биение шестерни приводной | Отцентровать муфты, установить при необходимости прокладки под мотор-редуктор и опоры шестерни приводной; отрегулировать положение шестерни приводной                                                                |
| Износ венца зубчатого до 20 % по толщине зуба                                    | Длительная эксплуатация, абразивность окружающей среды                       | Развернуть венец зубчатый на 180°                                                                                                                                                                                    |
| Износ венца зубчатого или шестерни приводной более 30 % по толщине зубьев        | Длительная эксплуатация, абразивность окружающей среды                       | Заменить изношенную деталь                                                                                                                                                                                           |



*Некоторые требования безопасности при эксплуатации барабанного гранулятора.* Для обеспечения надежной работы гранулятора необходимо выполнять график ремонтных работ и периодичность техосмотров, а также проводить регулярное комплексное техническое обслуживание.

Места погрузки и разгрузки должны быть оборудованы соответствующими подъемными и такелажными средствами и приспособлениями, которые отвечают требованиям, изложенным в технических условиях и эксплуатационных документах на это оборудование.

Состояние транспортных и погрузочных средств, приспособлений, тяговых канатов, сигнальной и пусковой аппаратуры должно быть проверено представителем технического надзора перед началом данных работ.

Гранулятор должен обеспечивать стабильный технологический процесс, надежность и безаварийность при эксплуатации и отвечать требованиям производственной санитарии.

*Моделирование процесса гранулирования.* При проектировании новых и модернизации действующих барабанных грануляторов необходимо иметь возможность не только прогнозировать гранулометрический состав готового продукта, но и рассчитывать оптимальные геометрические и режимные параметры гранулятора.

*Гранулирование методом окатывания на движущейся поверхности.* Значения динамических усилий на гранулу определенного размера напрямую зависит от вида ее движения. Частицы, находящиеся внутри вращающегося барабана, прижимаются к поверхности барабана под действием силы тяжести и центробежной силы, отклоняются от вертикали на угол  $\beta_d$  – угол ссыпания (подъема) (рисунок 4).

Величина данного угла зависит от коэффициента трения тела о поверхность барабана, от радиуса барабана, а также от скорости вращения барабана. На перемещение частиц в барабане влияют 3 силы: трения, тяжести и центробежная. По достижении максимального угла  $\beta_d$  частица теряет равновесие по отношению к барабану, то есть сдвигающая сила становится больше силы трения, что перемещает частицу вниз. Сразу исчезает действие центробежной силы на частицу, это приводит к нарушению динамического баланса и уменьшению силы трения. Скатывание частиц со стенок барабана характеризуется ускорением. Так как частица начинает двигаться по криволинейной траектории, центробежная сила возникает снова. Наибольшая скорость достигается, когда силы сдвига и трения уравниваются. Скорость падает, затем при определенном значении угла трения  $\beta$  тело останавливается. Частицы, оставаясь без движения относительно внешней системы координат, будут непрерывно скатываться по внутренней поверхности барабана, такой вид движения – окатывание. В случае, если частица остановилось после пересечения вертикальной плоскости, то под действием силы тяжести она будет вращаться в ту же сторону, что и барабан. Такое движение будет характеризоваться подъемом-скатыванием.

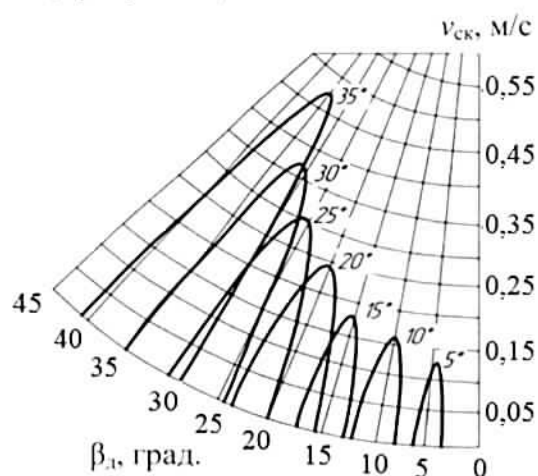


Рисунок 4 – Скорость скатывания  $v_{ск}$  частиц, обладающих разным трением, в барабане диаметром 3 м при частоте вращения барабана 10 об/мин

С ростом скорости вращения барабана увеличивается угол ссыпания (подъема). Увеличение происходит с ростом коэффициента трения. Режим окатывания является основным режимом движения частиц в барабанах небольшого размера. При высоких скоростях вращения барабана наблюдается челночный режим [4].

Скорость скатывания материала в барабанном грануляторе характеризуется такими параметрами как: насыпная плотность материала, коэффициент внутреннего трения материала, угол подъема (ссыпания) засыпки, радиус барабана, расстояние от центра барабана до скатывающего слоя, толщина скатывающегося слоя, предельное напряжение сдвига.

Из рисунка 4 видно, что скорость скатывания частиц, обладающих разным трением, в барабане диаметром 3 м при частоте вращения барабана 10 об/мин в зависимости от угла ссыпания (подъема), имеет значения, представленные в таблице 7.

Таблица 7 – Значения скорости скатывания частиц, соответствующие определенным углам подъема (ссыпания)

| Параметр                                     | Значение |      |     |      |
|----------------------------------------------|----------|------|-----|------|
| Угол ссыпания (подъема) частиц $\beta_{\pm}$ | 5°       | 15°  | 25° | 35°  |
| Скорость скатывания частиц $v_{ск}$ , м/с    | 0,12     | 0,17 | 0,3 | 0,47 |

Скорости скатывания частиц не должны превышать скорости, при которых происходит разрушение в процессе окатывания, а энергия, переданная от одной гранулы другой в момент столкновения, не должна превышать работу разрушения.

Из условия непрерывности потока следует: количество поднимающегося слоя материала равно количеству скатывающегося. Чем больше материала скатывается, тем больше время скатывания и, соответственно, скорость скатывания меньше.

Основной динамической характеристикой порошкообразных и гранулируемых материалов является коэффициент внутреннего трения  $f$ . Внутреннее трение происходит в слое сыпучего материала и характеризуется: плотностью укладки, упругими свойствами частиц твердой фазы, формой частиц, размерами, площадью фактических контактов.

Для порошкообразных материалов, между частицами которых существует сцепление, показатель внутреннего трения равен тангенсу угла внутреннего трения (угла естественного откоса) и определяется как (1):

$$f = \operatorname{tg} \beta. \quad (1)$$

Угол внутреннего трения для порошкообразных материалов (пм) – до 35°, для гранулированных (гм) – до 40°. Подставив в выражение (1) числовые значения, получим значения, которые занесем в таблицу 8.

$$\begin{aligned} f_{пм1} &= \operatorname{tg} 25^{\circ} = 0,47; & f_{гм1} &= \operatorname{tg} 36^{\circ} = 0,73; \\ f_{пм2} &= \operatorname{tg} 30^{\circ} = 0,58; & f_{гм2} &= \operatorname{tg} 38^{\circ} = 0,78; \\ f_{пм3} &= \operatorname{tg} 35^{\circ} = 0,7; & f_{гм3} &= \operatorname{tg} 40^{\circ} = 0,84. \end{aligned}$$

Таблица 8 – Зависимость коэффициента внутреннего трения от угла внутреннего трения для порошкообразных и гранулируемых материалов

| Параметр                           | Порошкообразные материалы |      |     | Гранулированные материалы |      |      |
|------------------------------------|---------------------------|------|-----|---------------------------|------|------|
| Угол внутреннего трения $\beta$    | 25°                       | 30°  | 35° | 36°                       | 38°  | 40°  |
| Коэффициент внутреннего трения $f$ | 0,47                      | 0,58 | 0,7 | 0,73                      | 0,78 | 0,84 |



Сыпучесть материалов – способность порошков под действием собственной силы тяжести скатываться с наклонной поверхности, в случае гранулирования методом окатывания в барабанном грануляторе – с изогнутой поверхности. Сыпучесть зависит от формы поверхности частиц; плотности; гранулометрического состава; сцепления частиц и трения между ними, и характеризуется углом трения крупиц (углом естественного откоса) о поверхность барабана и друг о друга.

Коэффициент сыпучести  $K_c$  определяется выражением (2):

$$K_c = \frac{1 - \sin \beta}{1 + \sin \beta}. \quad (2)$$

Подставив числовые значения в выражение, представленное выше, получим значения коэффициента сыпучести, сведем их в таблицу 9 и построим графики зависимости (рисунок 5).

$$K_{c1} = \frac{1 - \sin 25^\circ}{1 + \sin 25^\circ} = 0,41; \quad K_{c2} = \frac{1 - \sin 30^\circ}{1 + \sin 30^\circ} = 0,33; \quad K_{c3} = \frac{1 - \sin 35^\circ}{1 + \sin 35^\circ} = 0,27.$$

Таблица 9 – Значения коэффициентов сыпучести, зависящие от угла внутреннего трения

| Показатель                         | Значения |      |      |
|------------------------------------|----------|------|------|
| Угол внутреннего трения $\beta$    | 25°      | 30°  | 35°  |
| Коэффициент внутреннего трения $f$ | 0,47     | 0,58 | 0,7  |
| Коэффициент сыпучести $K_c$        | 0,41     | 0,33 | 0,27 |

Из графика (рисунок 5) видно, что с увеличением угла внутреннего трения коэффициент сыпучести уменьшается, а коэффициент внутреннего трения увеличивается. Также можно увидеть, что с увеличением коэффициента внутреннего трения, коэффициент сыпучести падает.

При малой степени заполнения барабана и относительно небольшой силе трения материала о внутреннюю поверхность барабана сыпучий материал ведет себя как сплошное тело.

При увеличении наклона поверхности загрузки до значения выше, чем угол внутреннего трения, избыточный материал начинает осыпаться, стремясь восстановить первоначальный угол. Центр тяжести при этом остается неизменным, вокруг него вращается материал: по свободной поверхности он сыпается вниз, около стенки – поднимается вверх.

Числовые значения линейных скоростей определяются силами трения слоев материала друг о друга и скоростью вращения барабана. Чем больший коэффициент трения имеет частица, тем быстрее она теряет свою скорость при сыпании.

Коэффициент  $K_{н.о.}$ , отражающий отношение количества поднимающегося сыпучего материала  $G_{под}$  к общему количеству материала  $G_{об.}$ , зависящий от параметров вращения барабана, определяется формулой (3):

$$K_{н.о.} = \frac{G_{под}}{G_{об.}} = f \frac{\omega^2 R}{g} = f \frac{n^2}{gR}, \quad (3)$$

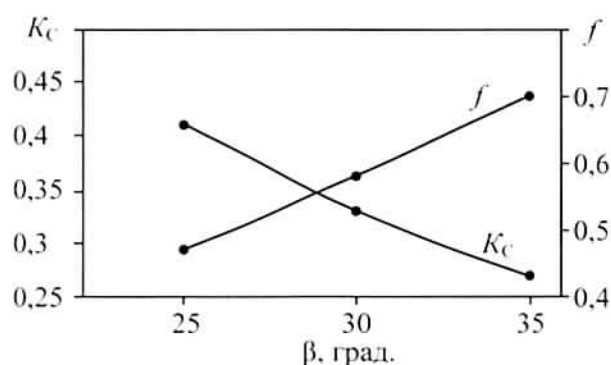


Рисунок 5 – График зависимостей коэффициента сыпучести и коэффициента внутреннего трения от угла внутреннего трения

где  $\omega$  – угловая скорость вращения барабана;

$n$  – частота вращения барабана;

$R$  – радиус барабана;

$g$  – ускорение свободного падения.

Для барабанного гранулятора, выпускаемого в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с опытным производством», частота вращения барабана варьируется от 4 до 12 об/мин. Диаметр барабана – 3 м.

Подставив в выражение (3) числовые значения, с учетом различных значений коэффициента внутреннего трения и частоты вращения барабана, получим значения, которые представлены в таблице 10.

При  $n_1 = 4$  об/мин = 0,07 об/с:

$$K_{\text{н.о.1}} = 0,47 \frac{0,07^2}{9,81 \cdot 1,5} = 1,57 \cdot 10^{-4}; \quad K_{\text{н.о.2}} = 0,58 \frac{0,07^2}{9,81 \cdot 1,5} = 1,93 \cdot 10^{-4}; \quad K_{\text{н.о.3}} = 0,7 \frac{0,07^2}{9,81 \cdot 1,5} = 2,33 \cdot 10^{-4}.$$

При  $n_2 = 8$  об/мин = 0,13 об/с:

$$K_{\text{н.о.1}} = 0,47 \frac{0,13^2}{9,81 \cdot 1,5} = 5,4 \cdot 10^{-4}; \quad K_{\text{н.о.2}} = 0,58 \frac{0,13^2}{9,81 \cdot 1,5} = 6,66 \cdot 10^{-4}; \quad K_{\text{н.о.3}} = 0,7 \frac{0,13^2}{9,81 \cdot 1,5} = 8,04 \cdot 10^{-4}.$$

При  $n_3 = 12$  об/мин = 0,2 об/с:

$$K_{\text{н.о.1}} = 0,47 \frac{0,2^2}{9,81 \cdot 1,5} = 12,78 \cdot 10^{-4}; \quad K_{\text{н.о.2}} = 0,58 \frac{0,2^2}{9,81 \cdot 1,5} = 15,77 \cdot 10^{-4}; \quad K_{\text{н.о.3}} = 0,7 \frac{0,2^2}{9,81 \cdot 1,5} = 19,03 \cdot 10^{-4}.$$

Таблица 10 – Значение коэффициента  $K_{\text{н.о.}}$  с учетом различных значений коэффициента внутреннего трения и угловой скорости вращения барабана

| Параметр                                     | Значения         |      |      |                  |      |      |                   |       |       |
|----------------------------------------------|------------------|------|------|------------------|------|------|-------------------|-------|-------|
|                                              | $n_1 = 4$ об/мин |      |      | $n_2 = 8$ об/мин |      |      | $n_3 = 12$ об/мин |       |       |
| Коэффициент внутреннего трения $f$           | 0,47             | 0,58 | 0,7  | 0,47             | 0,58 | 0,7  | 0,47              | 0,58  | 0,7   |
| Коэффициент $K_{\text{н.о.}} \times 10^{-4}$ | 1,57             | 1,93 | 2,33 | 5,4              | 6,66 | 8,04 | 12,78             | 15,77 | 19,03 |

Построим графики зависимостей коэффициента, отражающего отношение количества поднимающегося материала к общему количеству материала, от коэффициента внутреннего трения при различной частоте вращения барабана (рисунок 6).

Из рисунка 6 видно, что с увеличением коэффициента внутреннего трения увеличивается и коэффициент, отражающий отношение количества поднимающегося материала к общему количеству материала в барабане. Также можно увидеть, что с увеличением угловой скорости вращения барабана

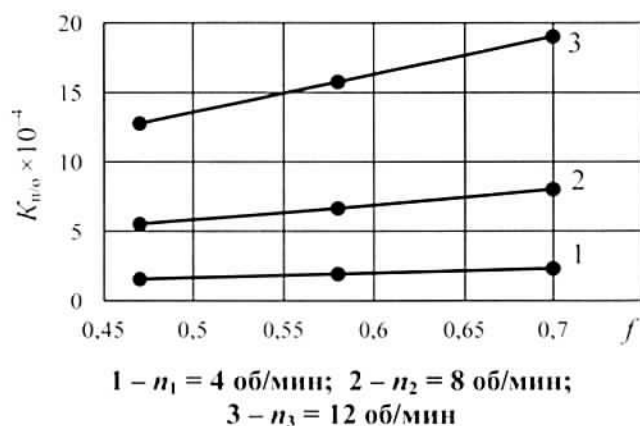


Рисунок 6 – График зависимостей коэффициента, отражающего отношение количества поднимающегося материала к общему количеству материала, от коэффициента внутреннего трения при различной частоте вращения барабана

при одинаковых значениях коэффициента внутреннего трения, коэффициент  $K_{\text{нб}}$  увеличивается. Это говорит о том, что при малой скорости вращения барабана меньшее количество гранулируемого материала поднимается относительно всего материала, засыпанного в барабан, вследствие чего на образование гранул готового продукта окатывания уходит больше времени. Гранулы, находящиеся внутри потока и соприкасающиеся с поднимающимся слоем, подвергаются большим динамическим нагрузкам, нежели гранулы, скатывающиеся из верхней части потока. Толщина скатывающегося слоя влияет на гранулометрический состав продукта окатывания и характеризуется коэффициентом заполнения [5].

Верхний угол загрузки  $\varphi$  зависит от угла подъема (ссыпания)  $\beta_d$  и определяется по формуле 4:

$$\varphi = 180^\circ - 2\beta_d. \quad (4)$$

Подставим числовые значения в формулу, представленную выше, и сведем их в таблицу 11:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 180^\circ - 2 \cdot 5^\circ = 170^\circ; & \varphi_2 &= 180^\circ - 2 \cdot 15^\circ = 150^\circ; \\ \varphi_3 &= 180^\circ - 2 \cdot 25^\circ = 130^\circ; & \varphi_4 &= 180^\circ - 2 \cdot 35^\circ = 110^\circ. \end{aligned}$$

Таблица 11 – Зависимость верхнего угла загрузки  $\varphi$  от угла подъема (ссыпания)  $\beta_d$

| Параметр                          | Значение |      |      |      |
|-----------------------------------|----------|------|------|------|
| Угол подъема (ссыпания) $\beta_d$ | 5°       | 15°  | 25°  | 35°  |
| Верхний угол загрузки $\varphi$   | 170°     | 150° | 130° | 110° |

Из таблицы и расчетов видно, что с увеличением угла подъема (ссыпания) верхний угол загрузки падает.

### Закключение

Процесс гранулирования сложно-смешанных минеральных удобрений методом окатывания на сегодняшний день еще недостаточно изучен и имеет ряд несовершенств [2]. Проблему улучшения качества минеральных удобрений следует решать за счет оптимизации технологического процесса путем детального его изучения на каждом этапе производства.

К основным недостаткам барабанных грануляторов относятся: низкий коэффициент загрузки, широкий фракционный состав гранулята, проскальзывание материала по стенкам барабана, невозможность контроля процесса образования гранул.

Выход целевой фракции не всегда соответствует предъявляемым требованиям. Чтобы успешно вести процесс гранулирования, необходимо для каждого конкретного вещества экспериментально подобрать режим. Важным параметром проведения гранулирования является продолжительность окатывания, определение которой носит чисто эмпирический характер [6], [7].

Недостаток произведенных расчетов процесса гранулирования методом окатывания заключается в том, что экспериментально полученные значения для сложно-смешанных удобрений могут варьироваться в зависимости от различных факторов проведения испытаний, а также значения коэффициентов в разных источниках литературы могут отличаться [8].

### Список использованных источников

1. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Влияние технологических параметров барабанного гранулятора на высоту подъема материала // Химическая технология и техника: материалы



85-ой науч.-технич. конф. профес.-препод. состава, научн. сотр. и аспирантов (с международным участием) / г. Минск (1 – 13 февр. 2021 г.). – Минск: БГТУ, 2021. – С. 67-70.

2. Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Получение НРК-удобрений методом окатывания // Материалы III Междунар. науч.-технич. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке / (2 – 3 дек. 2020 г.). – Минск: БГТУ. – С. 212-215.

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

4. Высоцкая Н.А., Францкевич В.С., Дубовский А.А. и др. Гранулирование методом окатывания на движущейся поверхности / Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 1. – С. 88-94.

5. Прушак В.Я., Кондратчик 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» // Труды БГТУ. – 2020. – Сер. 2, № 1. – С. 62-67.

6. Сковородников П.В., Черепанова М.В. Особенности процесса гранулирования органо-минеральных удобрений методом окатывания // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 9. – С. 51-59.

7. Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Применение барабанных грануляторов для получения сложносмешанных минеральных удобрений // Материалы IV Междунар. науч.-технич. форума по химич. технологиям и нефтегазопереработке / (22 – 24 нояб. 2021 г.). – Минск. – С. 224-228.

8. Высоцкая Н.А., Белько С.Л., Салцевич В.В. Основные параметры процесса производства азотно-фосфорно-калийных удобрений в барабанном грануляторе на силвинитово-обогатительной фабрике ОАО «Беларуськалий» / Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 4. – С. 79-86.

#### Информация об авторах

*Надежда Александровна Высоцкая* – аспирант УО «Белорусский государственный технологический университет», начальник отдела научно-технической информации, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: onti@sipr.by.

*Виталий Станиславович Францкевич* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: fvs2@tut.by.

#### Information about the authors

*Nadejda Aleksandrovna Vysotskaya* – Post-graduate Student, Belarusian State Technological University, Head of the Department of Scientific and Technical Information, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: onti@sipr.by.

*Vitali Stanislavovich Frantskevich* – Ph. D. (Engineering), Head of the Department “Machines and Apparatuses of Chemical and Silicate Production”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: fvs2@tut.by.

Поступила в редакцию 23.02.2024 г.