

УДК 661.152.3'1'2'3.099.2(045)(476)

Высоцкая Н.А.¹, Францквич В.С.²¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
г. Солигорск, Беларусь²УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь**ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ NPK-УДОБРЕНИЙ МЕТОДОМ ОКАТЫВАНИЯ**

Аннотация. Представлена классификация минеральных удобрений по содержанию главных питательных элементов (азота, фосфора, калия) и по способу производства. Описана методика определения гранулируемости хлорида калия, приведен технологический процесс гранулирования хлористого калия методом окатывания и его расчет. Описаны особенности производства комплексных сложносмешанных удобрений в ОАО «Беларуськалий» и отмечены преимущества комплексных удобрений.

Ключевые слова: гранулируемость, окатывание, процесс, барабан-гранулятор, удобрения.

Vysotskaya N.A.¹, Frantskevich V.S.²¹JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus²Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus**FEATURES OF OBTAINING NPK-FERTILIZERS BY PELLETIZING METHOD**

Abstract. The classification of mineral fertilizers by the content of the main nutrients (nitrogen, phosphorus, potassium) and by the method of production is presented. A technique for determining the granulation capacity of potassium chloride is described. The technological process of potassium chloride granulation by the pelletizing method and its calculation are presented. The features of production of complex compound fertilizers at JSC "Belaruskali" are stated and the advantages of complex fertilizers are noted.

Keywords: granulation, pelletizing, process, drum-granulator, fertilizers.

Введение. Получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур часто возможно лишь при создании оптимальной системы питания растений и, прежде всего, за счет применения удобрений [1-3]. В настоящее время в химической промышленности получили широкое распространение процессы гранулирования тонкодисперсных порошков. При этом в качестве связующих используют различные вещества, отличающиеся своей природой и свойствами [4-6]. Значительную роль и большое влияние на получаемый результат гранулирования оказывает взаимодействие связующих с компонентами тукосмеси. В результате такого взаимодействия возможно образование новых фаз и кристаллических соединений, которые могут повысить эффективность гранулирования и улучшить качество получаемого продукта [7-9]. Установление взаимодействия раствора связующего с компонентами тукосмеси при формировании гранул KCl является сложной задачей, т.к. в процессе гранулирования и сушки на поверхности и внутри гранул происходит образование новых фаз и кристаллических соединений, которые являются рентгеноаморфными и не поддаются анализу [10].

Во многих отраслях промышленности (строительных материалов, химической, металлургической, пищевой и др.), а также в сельском хозяйстве широкое применение получили гранулированные материалы. В связи с таким разнообразным применением этих материалов, а соответственно и предъявляемым к ним требованиям по грануло-

метрическому составу, прочности, теплопроводности и др., разработано большое количество способов и оборудования для их производства [11].

Применение гранулированного КСl соответствует требованиям сельского хозяйства. Гранулирование улучшает физические и агрохимические свойства КСl: не пылит при перегрузке, меньше слеживается, легко рассеивается и лучше усваивается растениями. Благодаря этому гранулированный КСl можно хранить и перевозить навалом, без упаковки и вносить в почву туковыми сеялками, что снижает расходы на перевозку и внесение его в почву [12].

Классификация. Минеральные удобрения могут содержать один или несколько разных питательных элементов. По содержанию в удобрениях трех главных питательных элементов – азота (N), фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) – они подразделяются на:

- простые – имеют в своем составе только один из трех питательных элементов;
- комплексные – в их состав входят какие-либо два или все три питательных элемента.

По числу главных питательных элементов простые и комплексные минеральные удобрения называются: односторонними, двойными, тройными (или полными).

По способу производства их делят на: сложные, сложносмешанные (или комбинированные), смешанные удобрения.

Комплексные удобрения, полученные путем химических реакций в заводской аппаратуре, называют сложными. Сложные удобрения содержат два или три питательных элемента в составе одного химического соединения.

К сложносмешанным или комбинированным удобрениям относятся комплексные удобрения, получаемые в едином технологическом процессе и содержащие в одной грануле два или три основных элемента, хотя и в виде различных химических соединений. Они производятся путем специальной химической и физической обработки первичного сырья или различных одно- и (или) двухкомпонентных удобрений. Для сложных и комбинированных удобрений характерна высокая концентрация основных питательных элементов и отсутствие либо малое количество балластных веществ, что обеспечивает значительную экономию труда и средств на их транспортировку, хранение и применение.

Смешанные удобрения – это смеси простых удобрений, получаемые в заводских условиях либо на тукосмесительных установках на местах использования удобрений путем «сухого» смешивания. Смешанные удобрения (тукосмеси) получают при смешивании двух или трех простых негранулированных или гранулированных удобрений на специальных тукосмесительных заводах, на крупных механизированных складах агрохимцентров или непосредственно в хозяйствах. При этом достигается значительная экономия труда и времени на внесение удобрений по сравнению с отдельным внесением и повышается их эффективность.

Методика определения гранулируемости хлорида калия. Гранулируемость – специфическое свойство дисперсных систем образовывать достаточно прочные агломераты в результате формирования фазовых контактов (так называемых «солевых мостиков») между частицами дисперсной фазы. Количественно она оценивается прочностью гранул кубической формы с размером ребра 4 мм, полученных в строго стандартизированных условиях из увлажненной, вязкопластичной пасты. Гранулируемость позволяет выявить количественные закономерности влияния химического состава дисперсного материала, подвергаемого гранулированию, и параметров технологического режима процесса на его производительность и качество продукта.

Сущность методики определения гранулируемости образцов КСl заключается в следующем. На поверхности пластины из текстолита размером 100×100 мм в специаль-

ные прорези 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 при измерении гранулируемости образцов порошкового КС1 целесообразно принять $W_{\text{п}} = 10\%$. 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 постоянной массы и охлаждается в эксикаторе над водопоглотителями. Статическую прочность полученных кубических гранул принимают за величину гранулируемости C .

Уплотнение пасты можно осуществлять и при другом давлении, учитывая, что гранулируемость 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 C от температуры, гранулируемость образцов определяется следующим образом. Пасту с влажностью 10 % вносят в кассету для формирования кубических гранул. Кассету плотно заворачивают и клеивают 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 минут, извлекают из кассеты. Охлаждают в эксикаторе до комнатной температуры в течение 25 минут и измеряют их статическую прочность. Каждый образец исследуется в двукратной повторности.

Гранулируемость КС1, определенная по описанной выше методике, характеризует способность образовывать достаточно прочные агломераты. Она пропорциональна прочности формирующейся полидисперсной структуры гранул, которая определяется концентрацией фазовых контактов и средней прочностью индивидуальных контактов (их площадь сечения). Отсюда следует, что величина C характеризует как производительность отделения грануляции по готовому продукту, так и прочность гранул последнего. Она не соответствует истинной прочности готовых гранул, получаемых в промышленном производстве, но должна быть пропорциональна ей.

Удобрения азотно-фосфорно-калийные комплексные представляют собой удобрения, в состав каждой гранулы которых одновременно входят три основных питательных элемента: азот (N), фосфор (P_2O_5) и калий (K_2O). Удобрения комплексные выпускаются с добавками и без добавок. В качестве добавок используют микроэлементы Cu^{+2} , Zn^{+2} , Mn^{+2} , B, S. Готовый продукт представляет собой гранулы круглой или овальной формы от светло-серого до красноватого цвета со слабым специфическим запахом.

Технологический процесс производства сложносмешанных минеральных удобрений методом паровой грануляции состоит из следующих операций:

- прием и складирование исходного сырья;
- подача исходных компонентов в производственный корпус;
- дозирование, измельчение и подача исходных компонентов в технологический процесс;
- приготовление шихты для гранулирования;

- гранулирование методом окатывания;
- сушка продуктов окатывания;
- очистка отходящих газов;
- классификация горячей продукции с отделением ретура;
- охлаждение надрешетного продукта;
- контрольная классификация готового продукта;
- складирование и отгрузка готовой продукции [13].

Исходные компоненты (кек калия хлористого, аммофос, диаммофос, карбамид, сульфат аммония) дозируются и подаются на измельчение в дезинтегратор. Измельченная смесь объединяется с пылью систем газоочистки и ретуrom процесса окатывания и подается в двухвальный смеситель. В смесителе происходит интенсивное перемешивание компонентов, увлажнение и образование шихты за счет подачи воды и абсорбционных стоков, подогрев, за счет подачи водяного пара. После смесителя увлажненная и подогретая масса поступает в барабан-гранулятор, в котором происходит образование гранул по ходу движения продукта методом окатывания. Шихта, состоящая из влажных гранул и неокатанных мелких частиц, из барабана-гранулятора поступает в сушильный барабан. В сушильном барабане осуществляется сушка продукта дымовыми газами. Высушенный продукт из сушильного барабана подается на предварительную классификацию, где происходит отсев мелкой фракции продукта менее 1 мм, являющейся ретуrom. Надрешетный продукт классификации поступает на охлаждение в барабан-охладитель. После охлаждения, гранулированный продукт подается на классификацию на просеивающую машину, где происходит отсев гранул размером более 5 мм и менее 1 мм. Фракция более 5 мм дробится и поступает обратно на классификацию. Фракция менее 1 мм направляется в ретур процесса окатывания. Товарная фракция продукта 1-5 мм поступает в барабанный смеситель для покрытия поверхности гранул антислеживающими составами. После кондиционирования, гранулированный продукт направляется на склад готовой продукции, где складировается навалом в отдельных отсеках в зависимости от выпускаемой марки. При отгрузке гранулированные комплексные удобрения направляются на контрольную классификацию по классу – 1 мм.

Создание производства комплексных сложносмешанных удобрений в ОАО «Беларуськалий». Начало производству комплексных удобрений в ОАО «Беларуськалий» было положено в 2010 году, когда за счет собственных средств на промплощадке 1 рудоуправления была введена в эксплуатацию тукосмесительная установка проектной мощностью 100 тыс. тонн в год.

В 2013 году осуществлен запуск цеха по выпуску комплексных азотно-фосфорно-калийных (NPK) удобрений мощностью 240 тыс. тонн в год. Для их производства используется инновационная технология паровой грануляции (fusion blend), которая позволяет получать продукт с содержанием в одной грануле трех основных питательных компонентов в требуемом соотношении, при этом полностью отсутствуют твердые и жидкие отходы, а выбросы в атмосферу сведены до минимума. Данный метод производства предпочтителен для ОАО «Беларуськалий» не только тем, что основной источник сырья – хлористый калий – продукт собственного производства, но и тем, что в качестве источника калия могут быть использованы полуфабрикаты обогатительной фабрики (пылевые фракции грануляции, сушки и влажный кек хлористого калия), что благоприятно отразилось на себестоимости производства новой продукции.

Существует множество методик расчета процесса гранулирования методом окатывания. Рассмотрим один из них.

Параметр распределения гранул продукта по размерам η рассчитывается по формуле (1):

$$\eta = 1 / (A + B d_{\text{cp}}), \quad (1)$$

где A, B – экспериментально полученные значения для удобрений, $A = 0,144, B = -0,029$;
 d_{cp} – средний диаметр гранул, мм.

Средний диаметр гранул продукта определяется уравнением (2):

$$d_{\text{cp}} = d_0 \exp \left[m \left(\frac{P}{1 - \xi + \xi (d_0 / d_p)} - P_0 \right)^n \right], \quad (2)$$

где d_0 – диаметр гранул, соответствующий началу гранулообразования, мм;

m и n – коэффициенты для фосфорсодержащих удобрений при различных температурах, $m = 23, n = 1,15$;

ξ – технологически необходимое содержание рецикла в шихте;

d_p – средний диаметр частиц рецикла, мм;

P_0 – содержание жидкой фазы, соответствующее началу гранулообразования, кг/кг.

Влагосодержание шихты P определяется по формуле (3):

$$P = (W + W_s + i) / (1 - W_s - i), \quad (3)$$

где W – начальное влагосодержание рецикла, %;

s – растворимость материала при 70 °С, кг/кг;

i – содержание расплава в шихте при 70 °С, кг/кг.

Расход воды с компонентами $G_{\text{в}}$ определяется из уравнения (4):

$$G_{\text{в}} = G_{\text{пр}} W / (1 - \xi), \quad (4)$$

где $G_{\text{пр}}$ – производительность по готовому продукту, т/ч.

Расход рецикла $G_{\text{рет}}$:

$$G_{\text{рет}} = G_{\text{пр}} \left(\frac{\xi}{1 - \xi} \right). \quad (5)$$

Объемная производительность гранулятора G определяется уравнением (6):

$$G = \frac{G_{\text{пр}} (1 + W)}{\rho_{\text{ш}} (1 - \xi)}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ш}}$ – насыпная масса шихты, т/м³.

Коэффициент заполнения барабана Φ определяется по формуле (7):

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} (\varphi - \sin \varphi), \quad \varphi \pm 108^\circ, \quad (7)$$

где φ – центральный угол обхвата в барабане.

Скорость подъема материала около стенки барабана:

$$v_{\text{под}} = v_{\text{ск}} \left(\frac{(1 - \psi)\varphi}{2\psi \sin(\varphi/2)} \right), \quad (8)$$

где $v_{\text{ск}}$ – скорость скатывания частиц в слое, м/с;

ψ – коэффициент, для грануляторов $\psi = 0,55-0,60$.

Диаметр барабана D находится из формулы (9):

$$D = \sqrt[3]{4Q\tau / (\pi\Phi K)}, \quad (9)$$

где Q – производительность, т/ч;

τ – время пребывания в грануляторе, мин;
 K – соотношение длины к диаметру барабана.

Длина барабана:

$$L = KD. \quad (10)$$

Угловая скорость барабана:

$$\omega = 2v_{\text{под}} / D. \quad (11)$$

Диаметр отверстия подпорного кольца D_0 определяется по формуле (12):

$$D_0 = D \cos(\varphi/2) + 2H, \quad (12)$$

где H – высота, $H = 0,05-0,15$ м, в зависимости от производительности и свойств материала.

Недостаток данной методики расчета процесса гранулирования методом окатывания заключается в том, что экспериментально полученные значения для сложносмешанных удобрений могут варьироваться в зависимости от различных факторов проведения испытаний, а также в том, что значения коэффициентов в разных источниках литературы могут отличаться.

Заключение. Перспективность основного метода гранулирования фосфорсодержащих удобрений – окатывания – обусловлена применением агрегатов большой единичной мощности (40, 60 и 80 т/ч) для производства удобрений. Важнейшим направлением развития техники гранулирования фосфорсодержащих удобрений является создание безвыбросных производств, требующих использования концентрированных фосфорной и других кислот для получения расплава сложных удобрений. Гранулирование удобрений, достигаемое охлаждением расплавов, позволяет исключить стадию сушки и связанные с ней выбросы фтористых газов и аммиака, а также громоздкую систему абсорбции.

Преимущества комплексных удобрений (для основного внесения в почву):

- сбалансированность всех элементов питания с учетом биологических особенностей сельскохозяйственных культур или групп культур, а также с учетом обеспеченности почв фосфором и калием;

- повышение равномерности распределения удобрений по поверхности почвы.

Процесс гранулирования сложносмешанных минеральных удобрений на сегодняшний день еще недостаточно изучен и имеет ряд несовершенств. Для решения данной проблемы требуется детальное изучение процесса на каждом его этапе.

Список использованных источников

1. Пасынкова, Е.Н. Эффективность минеральных удобрений при возделывании пленчатого и голозерного овса / Е.Н. Пасынкова, А.В. Пасынков, С.А. Баландина // Агро XXI. – 2012. – № 10-12. – С. 36-39.

2. Агрехимические аспекты возделывания озимого рапса / Ф.Н. Леонов [и др.] // Земляробства і ахова раслін. – 2009. – № 5. – С. 15-21.

3. Леонов, Ф.Н. Эффективность минеральных удобрений в зависимости от обеспеченности подвижными фосфатами дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / Ф.Н. Леонов, Т.Г. Синевич // Почвоведение и агрохимия. – 2017. – № 1 (58). – С. 109-116.

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

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

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

7. Способ получения гранулированного калийного удобрения: пат. 2357943 РФ, МПК C05D1/02 / Н.П. Крутько [и др.]; заявитель РУП «ПО «Беларуськалий», ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАНБ». – № 2007122887/15; заявл. 18.06.07; опубл. 10.06.09 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2009. – Бюл. № 16. – 7 с.

8. Модифицированное связующее на основе новолачных и резольных смол и способ его изготовления: пат. 2616294 РФ, МПК C08G8/36, C08G8/28 / Б.А. Булгаков [и др.]; заявитель ФКП «Алексинский химический комбинат». – № 2015142154; заявл. 05.10.15; опубл. 14.04.17 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2017. – Бюл. № 11. – 10 с.

9. Черепанова, М.В. Технология гранулирования циклонной пыли хлорида калия методом окатывания: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01 / М.В. Черепанова. – СПб., 2013. – 182 л.

10. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for HiTech industries / P.G. Kudryavtsev // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2014. – V. 16, № 2. – P. 147-170.

11. Шкарпеткин, Е.А. Анализ методов получения гранул и средств их реализации / Е.А. Шкарпеткин // Наука и современность. – 2010. – № 2-2. – С. 378-383.

12. Прушак, В.Я. Разработка новых технических решений по увеличению выпуска гранулированного хлорида калия с применением валковых прессов, изготавливаемых в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» / В.Я. Прушак, Н.Ю. Кондратчик, Н.А. Высоцкая / Труды БГТУ. – 2020. – Серия 2, № 1. – С. 62-67.

13. Кондратчик, Н.Ю. Методы гранулирования НРК-удобрений. Способы гранулирования методом прессования и окатывания / Н.Ю. Кондратчик, Н.А. Высоцкая, В.С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 1. – С. 56-70.

Информация об авторах

Information about the authors

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

Vysotskaya Nadezhda Aleksandrovna – Post-graduate Student, Belarusian State Technological University, Deputy 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: ipr@sipr.by.

Францкевич Виталий Станиславович – 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.

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