

различного профиля (машиностроительного, строительного, технологического, электрического и т.д.) [1-3].

Внедрение и использование в промышленном производстве различных расчетно-графических САПР и САД-систем общего машиностроения позволяет:

- сократить сроки проектирования в 2–4 раза;
- повысить производительность труда на 50 %;
- снизить материалоемкость проектируемого оборудования на 10–15 %;
- уменьшить энергозатраты и транспортные расходы в проекте на 15–20 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гарабажиу, А. А. Применение библиотек системы КОМПАС-ГРАФИК при создании учебной чертежно-конструкторской документации / А. А. Гарабажиу, Д. В. Клоков, А. Ю. Лешкевич // Инновационные технологии в инженерной графике. Проблемы и перспективы: сборник трудов международной научно-практической конференции, Брест, 20 апреля 2018 г. / отв. ред. О.А. Акулова. – Брест: БрГТУ, 2018. – С. 84-88.

2. Гарабажиу, А. А. Использование системы КОМПАС-3D при создании учебной чертежно-конструкторской документации / А. А. Гарабажиу, Д. В. Клоков, Д. Н. Боровский, Е. А. Леонов // Автомобиле- и тракторостроение: материалы международной научно-практической конференции, Минск, 14-18 мая 2018 г.: в 2 т. / Белорусский национальный технический университет: отв. ред. Д.В. Капский. – Минск, 2018. – Т. 2. – С. 217-220.

3. Гарабажиу, А. А. Опыт применения систем автоматизированного проектирования КОМПАС-3D и AutoCAD в учебном процессе графической подготовки будущих инженеров / А. А. Гарабажиу, Д. В. Клоков, Д. Н. Боровский, Е. А. Леонов // Инновационные технологии в инженерной графике. Проблемы и перспективы: сборник трудов международной научно-практической конференции, Новосибирск, 19 апреля 2019 г. / отв. ред. К.А. Вольхин. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2019. – С. 69-74.

УДК 66.099.2

Н.А. Высоцкая, асп. (ЗАО «СИПРсОП», г. Солигорск),  
В. С. Францкевич, зав. каф., доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## СПОСОБЫ ГРАНУЛИРОВАНИЯ УДОБРЕНИЙ

Гранулированные комплексные NPK- удобрения, содержащие азот, фосфор и калий, пользуются наибольшим спросом у потребителей, поскольку обладают высоким содержанием питательных компонентов и хорошими физико-химическими и механическими свойствами. При грануляции удобрений в первую очередь достигается улучшение их физических и механических свойств: они не пылят при внесении, снижаются потери при транспортировке, хранении и внесении в почву, имеют повышенную рассыпчатость, меньше склонны к слеживанию при хранении, выровненный гранулометрический состав и низкое содержание мелкодисперсной фракции (размером менее 1 мм) позволяет их транспортировку и хранение навалом. Гранулированные удобрения легче дозировать и упаковывать, производственные процессы при этом могут быть максимально автоматизированы и механизированы.

**Процесс грануляции** является одним из ключевых операций в технологии производства минеральных удобрений, напрямую влияющим на качество продукта.

В общем случае гранулирование включает в себя следующие технологические стадии:

- подготовку исходного сырья, дозирование и смешение компонентов;
- собственно гранулообразование (агломерация, наслаивание, окатывание, кристаллизация, уплотнение и др.);
- формирование структуры (сушка, термостатирование, полимеризация и др.);
- сортировка (разделение частиц по размерам) и дробление крупных фракций с последующим выделением товарного продукта.

Основными методами гранулирования фосфорсодержащих удобрений являются: разбрызгивание расплавов и охлаждение их в грануляционных башнях; прессование сухих порошков и тукосмесей; распыливание в псевдооживленном слое; окатывание, в том числе распыливание пульпы на поверхность частиц, сочетаемое с последующим окатыванием (этим методом гранулируют большую часть фосфорсодержащих удобрений).

Наиболее распространенным методом гранулирования на ОАО «Беларуськалий» является прессование. Реже используется метод окатывания.

Компактирование (прессование) – процесс уплотнения мелкодисперсных сыпучих материалов между двумя вращающимися навстречу друг другу профилированными валками, материала в так называемые плитки, т. е. полосу материала определенной толщины. В

отличие от традиционных методов влажной грануляции, метод компактирования позволяет использовать сухие исходные материалы практически из неограниченного числа источников и без особых требований к размеру частиц.

Преимущества процесса сухого компактирования (прессования):

- сухой процесс, не требующий добавления воды или связующего вещества;
- технология без добавления воды, без сушки;
- потребление электроэнергии на 30% меньше, чем при мокрой грануляции;
- стабильное распределение NPK по фракциям;
- так как нет проблем с коррозией, эксплуатационные затраты ниже;
- очень низкий уровень выбросов, потому что в техпроцессе не используется вода или газ;
- меньше размер инвестиций в оборудование, т.к. отсутствует сушилка и охладитель. Техпроцесс хорошо адаптируется к местным условиям (нет очень сложных технологий);
- удобрения, произведенные с помощью компактирования (прессования), менее склонны к слипанию и более долговечны, как следствие снижение слеживаемости.

Перспективность основного метода гранулирования фосфорсодержащих удобрений – окатывание – 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.

Гранулирование окатыванием включает следующие 4 стадии:

- 1) смешение исходного вещества со связующим;
- 2) формирование гранул из мелких частиц;
- 3) окатывание и уплотнение гранул при их перемещении по поверхности аппарата;
- 4) упрочнение структуры гранулы.

Технологии комплексных удобрений с аппаратами АГ-СБ. Основными преимуществами данного способа являются:

- высокая производительность одной технологической линии;

- широкий ассортимент выпускаемых марок удобрений;
- низкие энергозатраты;
- возможность оперативного перехода между различными видами продукта;
- высокое качество готового продукта.

Аммонизатор-гранулятор. Аммонизатор-гранулятор (АГ) – аппарат барабанного типа, совмещающий в себе процессы аммонизации и гранулирования. За счёт тепла, выделяющегося при взаимодействии аммиака с кислотами, в АГ происходит также и подсушка материала. Это позволяет сократить энергозатраты на единицу продукции, а также продолжительность технологического цикла и количество необходимого оборудования в технологической линии по сравнению с другими способами.

Аппараты АГ имеют достаточно высокую производительность. Технологическая линия, включающая в себя АГ является высокопроизводительной. Совмещение в одном аппарате процессов смешения, аммонизации и гранулирования позволяет снизить энергозатраты, а также улучшить качество минеральных удобрений.

Технологии комплексных удобрений с аппаратами БГС. В настоящее время наиболее широко распространены технологические схемы, где процессы гранулирования и сушки совмещены в одном аппарате – барабанном грануляторе-сушилке (БГС).

Широкое применение технологии удобрений на основе аппарата БГС обусловлено следующими причинами:

- Технология с БГС позволяет производить широкий ассортимент удобрений высокого качества, в т.ч. удобрений, плохо поддающихся гранулированию методом окатывания: Р, РК, некоторые виды НРК.
- Удобрения, полученные по схеме с БГС, благодаря механизму гранулирования обладают высокой статической прочностью и высокой степенью сферичности.
- Получаемый продукт соответствует заданному узкому гранулометрическому составу.

Схемы с аппаратами БГС включают в себя меньше единиц оборудования, вследствие чего снижается расход электроэнергии, а также для их создания требуется меньше капитальных вложений. Более короткая транспортная (ретурная) цепочка может обеспечить меньшее количество выходов оборудования из строя, что увеличивает эффективный рабочий фонд времени и снижает затраты на ремонт. Технологические нитки с аппаратами БГС традиционно считаются малоре-

турными, что также снижает энергозатраты и позволяет использовать транспортное оборудование меньшей производительности (и, соответственно, с меньшей стоимостью). Особенностью гранулирования и сушки удобрений в БГС является периодическое колебание гранулометрического состава и связанное с этим изменение массовых расходов ретур и готового продукта. Эти процессы оказывают негативное влияние и на свойства удобрений. Для стабилизации процессов гранулирования и сушки, а также для получения качественных показателей продукта необходимо поддерживать определенный расход и качество внешнего ретура.

В большинстве случаев при гранулировании сложных и сложно-смешанных удобрений ретур вводится в грануляционный аппарат для поддержания оптимальной влажности и обеспечения максимального выхода товарной фракции. В отдельных случаях, при гранулировании удобрений методом прессования либо гранулирования суперфосфата методом окатывания в присутствии влаги, ретур не требуется, однако он образуется в процессе гранулирования. В этих случаях стремятся вести процесс с минимальным выходом ретура - мелкой фракции.

**Заключение.** Развитие техники гранулирования обычно тесно связано с общим развитием технологии производства того или иного продукта. Выбор метода гранулирования зависит от конкретного производства. Так, методы гранулирования полимерных материалов оказываются непригодными для гранулирования минеральных удобрений и наоборот. Тем не менее, существуют общие принципы подхода к выбору наиболее целесообразных методов гранулирования в зависимости от агрегатного состояния и физических свойств исходных веществ.

Большинство из выпускаемых на данный момент сложных фосфоросодержащих минеральных удобрений производится методом окатывания с использованием связующего компонента на частицах ретура в барабанных агрегатах.

УДК 66.063.8

О. А. Петров, доц., канд. техн. наук;  
В. Н. Павлечко, доц., канд. техн. наук;  
В. С. Францкевич, зав. каф., доц., канд. техн. наук;  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ С МАЛОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ОДНОГО ИЗ КОМПОНЕНТОВ В ВЫСОКИХ ЕМКОСТЯХ**

Перемешивание в жидких средах широко распространено в промышленности, этот процесс лучше разработан теоретически, и для его осуществления разработано и создано наиболее совершенное оборудование. Перемешивание жидкостей можно осуществить непосредственно в трубопроводе за счет турбулентности потока протекающей жидкости, либо в специальных аппаратах периодического или непрерывного действия, в которых создается турбулентное движение и циркуляция жидкости. Циркуляция может создаваться перекачиванием жидкости по замкнутому контуру, продуванием сжатого воздуха или применением механических мешалок [1].

Однако в некоторых технологических процессах возникают особенности, не позволяющие эффективно воспользоваться традиционными средствами, то есть требующие специфического подхода. Такой спецификой отличается перемешивание жидкостей с малой концентрацией одного из компонентов в емкостях большого объема ( $50 \text{ м}^3$  и более) с отношением высоты к диаметру  $H/D = 3$  и более. Это в частности характерно для многотоннажных производств технических жидкостей (масла, смазки, смазочно-охлаждающие технические средства (СОТС) и др.).

Производственная задача, решаемая нами, заключалась в необходимости интенсификации процесса перемешивания нефтяного пластификатора (масла) с небольшим количеством концентрата (около 6%) в обогреваемой цилиндрической емкости (сборнике) объемом более  $50 \text{ м}^3$  и высотой более 10 м, имеющей циркуляционный контур в нижней части. Причем задача усложнялась неприемлемостью сколь-нибудь значительного изменения существующей конструкции оборудования на первом этапе.

В ходе проведенных исследований было выяснено, что находящийся в сборнике продукт нагрет неравномерно. Возле стенок за счет электрообогрева смесь имеет температуру  $t_{\text{ст}} = 90^\circ\text{C}$  и среднюю плотность  $\rho_{\text{ст}} = 916,43 \text{ кг/м}^3$ , по центру аппарата – температуру  $t_{\text{ср}} = 85^\circ\text{C}$  и среднюю плотность  $921,43 \text{ кг/м}^3$ . То есть имеет место термогравитационная конвекция в неравномерно нагретой жидкости. Вследствие разности плотностей возникает разность гравитационных сил, представляющая собой подъемную (опускную) силу. В периферийной области возле цилиндрической стенки продукт, имеющий меньшую плотность, поднимается снизу вверх, а в центральной части с большей плотностью опускается вниз. Была рассчитана характерная скорость свободной конвекции продукта, которая составила  $w_0 = 0,584 \text{ м/с}$ .

Продукт вводится в сборник насосом, снизу имеется циркуляционный контур. Скорость ввода продукта  $w_{\text{п}} = 0,51 \text{ м/с}$  сопоставима со скоростью свободной циркуляции  $w_0 = 0,584 \text{ м/с}$ . Кроме того, при