

## Компьютерный тренажер операторов технологического процесса гранулирования аммофоса в барабанном грануляторе-сушилке

*О.Ф. Козырь<sup>1</sup>, В.А. Кривоносов<sup>1</sup>, В.В. Соколов<sup>2</sup>, В.А. Бабенков<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)  
«Национальный исследовательский технологический институт «МИСиС»»*

*<sup>2</sup>Череповецкий государственный университет*

*<sup>3</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам имени профессора Я.В. Самойлова» (АО «НИУИФ»), г. Череповец, Вологодская область*

**Аннотация:** Рассматривается компьютерный тренажер для подготовки операторов технологического процесса гранулирования аммофоса в барабанном грануляторе-сушилке. Кратко описан технологический объект и требования к управлению процессом гранулирования. Приведены функции тренажера, структура его математического и алгоритмического обеспечения. Программная реализация тренажера выполнена в среде Visual Basic.

**Ключевые слова:** компьютерный тренажер, математическая модель, алгоритмическое обеспечение, подготовка операторов технологического процесса, гранулирование, барабанный гранулятор-сушилка, диаметр гранул, аммофосная пульпа.

Рынок гранулированных минеральных удобрений предъявляет достаточно жесткие требования к физико-химическим характеристикам продукции. Химический состав аммофоса, отвечающий всем требованиям стандартов, на предприятиях компании ФосАгро обеспечивается высоким качеством используемого фосфатного сырья и правильным дозированием компонентов аммофосной пульпы – экстракционной фосфорной кислоты и аммиака. Физические характеристики гранулированного аммофоса (гранулометрический состав, прочность, влажность и слеживаемость) зависят, прежде всего, от качества ведения процесса гранулирования и сушки, который осуществляется в барабанных грануляторах-сушилках (БГС) [1-3].

На вход вращающегося барабана БГС подаются следующие потоки:

- жидкая аммофосная пульпа;

- внешний ретур – включающий мелкую фракцию гранул аммофоса (менее 2,5 мм), выделенную на грохотах из потока на выходе барабана, а также гранулы, полученные в результате дробления крупной фракции выхода БГС на дробилке;

- внутренний ретур – гранулы, возвращаемые от подпорного кольца, расположенного в середине барабана БГС, на его вход (циркуляция в БГС);

- высокотемпературный газовый поток, полученный в результате сжигания природного газа в топке БГС и последующего разбавления продуктов сгорания атмосферным воздухом.

Потоки внешнего и внутреннего ретура создают на входе барабана БГС завесу из гранул, на которую форсункой распыляется жидкая аммофосная пульпа в высокотемпературной газовой среде, что приводит к росту диаметра гранул. Кроме того, после контакта с пульпой происходит агрегирование некоторых из полученных влажных и мягких гранул с образованием конгломерата большего диаметра.

При вращении барабана гранулы аммофоса окатываются, подсушиваются и перемещаются к выходу. Газовый поток из БГС, содержащий пылеобразные фракции аммофоса, а также аммиак, подается на абсорбцию. Поток гранул из барабана поступает на два параллельно работающих грохота, в каждом из которых установлено по два сита, предназначенных для разделения аммофоса на три потока:

- гранулы с диаметром менее 2,5 мм, которые отправляются в поток внешнего ретура;

- гранулы, диаметр  $d$  которых лежит в пределах  $2,5 \leq d \leq 5$  мм – товарная фракция;

- крупная фракция с диаметром более 5 мм, которая направляется для измельчения на дробилку, а после дробления поступает в поток внешнего ретура.

---

Технологический регламент ограничивает минимальное значение расхода  $F_{\text{PET}}(t)$  внешнего ретура -  $F_{\text{PET}}(t) \geq F_{\text{PET\_MIN}}(t)$ . Такое ограничение обусловлено тем, что при низком значении  $F_{\text{PET}}(t)$  не удастся создать необходимую плотность завесы из гранул ретура на входе барабана БГС. При этом часть капель аммофосной пульпы из форсунки не попадает на гранулы ретура, а высыхает, образуя мелкую пылеобразную фракцию, которая вместе с газовым потоком выносится в отделение абсорбции.

Поэтому при  $F_{\text{PET}}(t) < F_{\text{PET\_MIN}}(t)$  часть гранул товарной фракции направляется на дробилку вместе с крупной фракцией. Управление этим потоком осуществляется контуром автоматического управления, регулирующим положение шиберов, сбрасывающего часть товарной продукции через дробилку в поток внешнего ретура.

Дробилка имеет частотно-регулируемый электропривод. Изменение частоты питания привода позволяет регулировать степень измельчения гранул. Повышение частоты приводит к более интенсивному измельчению, что снижает средний эквивалентный диаметр гранул внешнего ретура.

При управлении процессом гранулирования в БГС необходимо обеспечить выполнение следующих требований [3-4]:

- поддержание заданной производительности технологической линии;
- диаметры гранул товарной фракции должны попадать в регламентный диапазон;
- влажность гранул не превышает максимально допустимое значение;
- температура и скорость движения газовой среды на выходе барабана БГС не превышает максимально допустимых значений. Высокая температура приводит к выделению аммиака из аммофоса в газовую среду.

При заданном расходе аммофосной пульпы, определяющим производительность линии гранулирования, оператор технологического процесса может использовать следующие управляющие воздействия:

---

- расход природного газа и воздуха на горелку в топке;
- расход воздуха на разбавление горячего газового потока из топки в барабан БГС;
- частота электропитания привода дробилки, измельчающей гранулы.

Изменение расходов газа и воздуха позволяет управлять температурой газового потока в барабане БГС. Это, в свою очередь, влияет на влажность гранул и, соответственно, на скорость роста их диаметра в барабане за счет агрегирования некоторых влажных гранул с образованием более крупных [5] конгломератов.

Непрерывный приборный контроль процесса грануляции включает измерения следующих параметров:

- расход аммофосной пульпы в барабан БГС;
- расходы природного газа и воздуха на горелку топки БГС;
- расход воздуха на разбавление горячих топочных газов;
- расход внешнего ретурна в барабан БГС;
- расход товарной фракции на выходе линии грануляции;
- положение шибера сброса гранул товарной фракции на дробилку;
- частота питания и ток электропривода дробилки;
- температура газов на выходе из барабана БГС.

Регулярно осуществляется отбор проб товарной фракции для лабораторного анализа содержания азота, фосфора, влажности и гранулометрического состава.

Технологическая линия гранулирования, включающая БГС, грохоты классификации гранул по размеру, дробилку, а также конвейеры, представляют собой весьма инерционную систему с различной динамикой по основным характеристикам технологического процесса. Наиболее существенное влияние на формирование гранулометрического состава на выходе из БГС оказывают расход и средний диаметр гранул внешнего ретурна

---

[5, 6]. Управление процессом осложняется отсутствием оперативной информации о гранулометрическом составе внешнего ретура, выхода из барабана БГС и гранул товарной фракции.

В этих условиях оператор должен уметь прогнозировать дальнейшее развитие процесса гранулирования на основе анализа предыстории изменения измеряемых расходов, а также частоты питания и токовой нагрузки электропривода дробилки. Кроме того, для предотвращения значительных колебаний параметров процесса гранулирования, недопустимого роста влажности продукции, оператор должен иметь навыки своевременной адекватной коррекции хода технологического процесса путем изменения частоты питания привода дробилки, а также тепловой производительности горелки.

Оценка текущего состояния процесса и выбор управляющих воздействий осложняются существенно разной инерционностью объекта по различным каналам. Эффективным средством создания и совершенствования умений и навыков операторов технологических процессов являются компьютерные тренажеры [7-9].

Математическое обеспечение [10] тренажера операторов процесса гранулирования аммофоса включает следующие динамические математические модели:

- модель зависимости температуры газовой среды на выходе из БГС от расходов природного газа и воздуха в топку БГС;
- модель процесса формирования расхода и гранулометрического состава потока на выходе барабана БГС с учетом напыления аммофосной пульпы на гранулы внутреннего и внешнего ретура [5, 6], а также слипания и накатывания мелких и влажных гранул в более крупные;

- модель влияния частоты питания электропривода дробилки на гранулометрический состав внешнего ретура, полученная на основе обработки экспериментальных данных;
- модель зависимости расхода и гранулометрического состава внешнего ретура от расхода и гранулометрического состава потока гранул на выходе барабана БГС;
- модель разделения потока на выходе БГС ситами грохота в зависимости от диаметра гранул на три фракции: мелкая фракция с диаметром гранул менее 2,5 мм (фракция полностью поступает во внешний ретур); товарная фракция с диаметром гранул от 2,5 мм до 5 мм; крупная фракция с диаметром гранул более 5 мм (фракция полностью поступает на дробилку для измельчения, после чего подается во внешний ретур);
- модель контура автоматического управления положением шибера, осуществляющего подачу части товарной фракции через дробилку во внешний ретур;
- модель перемещения внешнего ретура транспортерами от сит грохота и от дробилки до входа в барабан БГС, полученная на основе данных о длинах конвейеров и скорости их движения.

В тренажере используется дискретная форма математических моделей с периодом дискретности  $\Delta t = 5$  мин.

Структура алгоритмического обеспечения компьютерного тренажера в виде укрупненной схемы алгоритма приведена на рисунке 1.

Тренажер содержит набор различных вариантов исходных параметров, характеризующих технологическую ситуацию, который в начале работы выводится обучаемому на экран для ознакомления. Инструктор может пополнять или изменять варианты этого набора.

Обучаемый выбирает вариант, анализирует технологические параметры процесса и вводит необходимые, по его мнению, управляющие

---

воздействия, постоянные на ближайшие модельные 20 минут работы участка гранулирования. Используя динамические математические модели, тренажер выполняет расчет изменения всех параметров объекта управления за 20 минут и новые значения выводит на экран. При этом технологические параметры, измеряемые на реальном технологическом объекте непрерывно с использованием датчиков (расходы, температура газовой среды на выходе барабана БГС, положение шибера и ток электропривода дробилки), выводятся в виде непрерывных графиков.

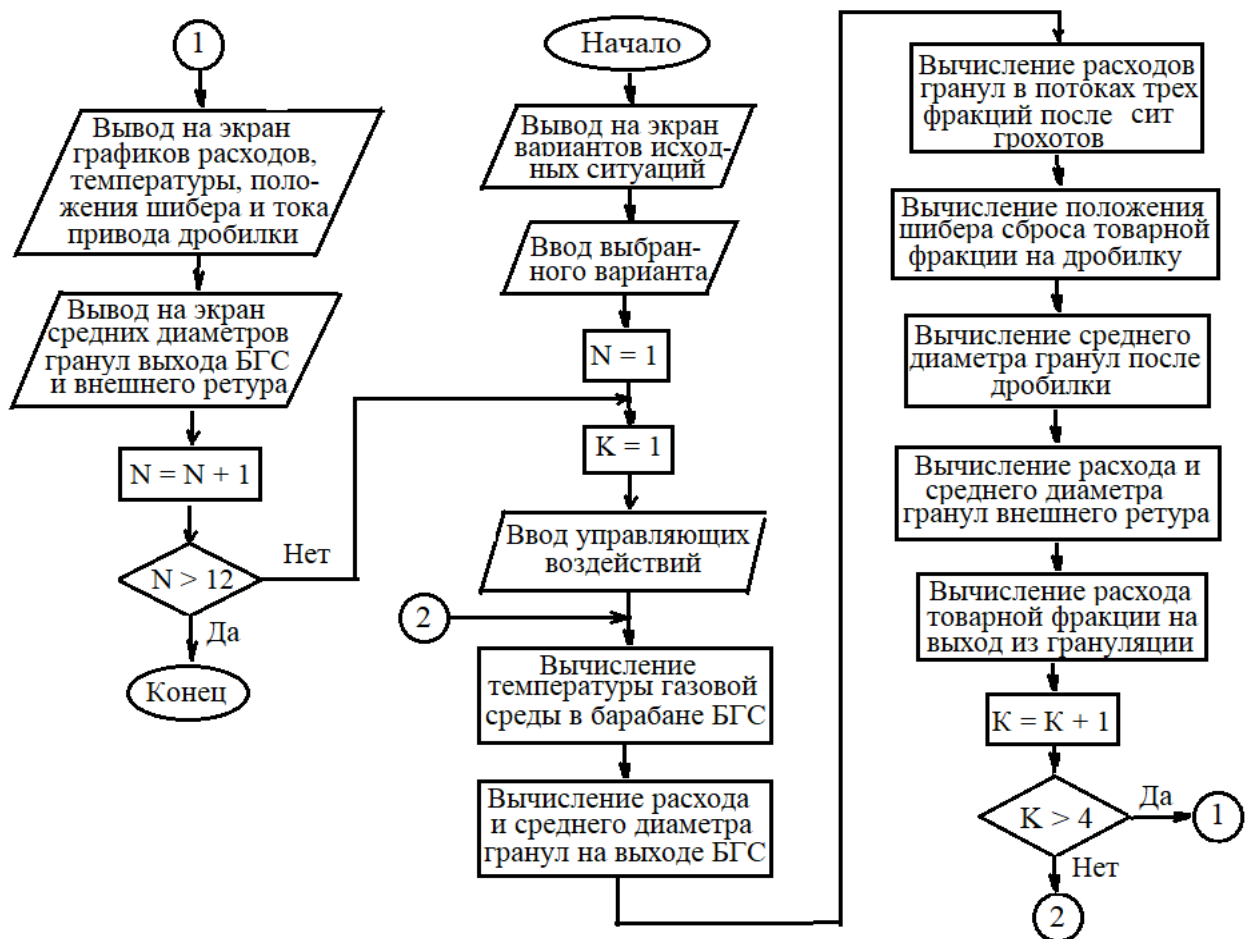


Рис.1 - Схема алгоритма компьютерного тренажера операторов процесса гранулирования аммофоса в БГС

Средние диаметры гранул внешнего ретурра и выхода барабана БГС, неконтролируемые оперативно, в режиме обучения выводятся на экран в численной форме. В экзаменационном режиме этот вывод может быть

отключен экзаменатором. Если управляющие воздействия оператора могут привести к нарушению технологического регламента, на экран выводятся соответствующие сообщения. Так, например, при низкой температуре газовой среды на выходе БГС, формируется сообщение о том, что влажность производственных гранул на выходе может превысить предельно допустимый уровень.

Программная реализация тренажера операторов технологического процесса гранулирования аммофоса выполнена в среде Visual Basic VB6. Использование тренажера в процессе обучения оперативного персонала, проверки его знаний и навыков позволяет уменьшить время обучения, повысить уровень подготовки и качество управления технологическим процессом, снизить вероятность нарушения технологического регламента в производстве аммофоса.

### Литература

1. Walker G.M., 2000. Drum granulation of NPK fertilizers.// Powder Technology. 2000. № 107. pp. 282-288
2. Францкевич В.С., Высоцкая Н.А., Дворник А.П. Гранулирование сложно-смешанных удобрений в барабанном грануляторе – сушилке // Механика. Исследования и инновации. 2021. № 14. С. 226 - 233
3. Adetayo A.A., Litster J.D., Cameron I.T. Cameron Steady State modelling and simulation of a fertilizer granulation circuit.// Computers & Chemical Engineering. 1995. Vol. 19, № 4. pp. 383-393
4. Дудка С.В., Тошинский В.И. Исследование процесса грануляции и сушки в технологии удобрений марки «Суперагро N: P 10:40» // Восточно-Европейский журнал передовых технологий (ISSN 1729-3774). 2012. Том 4, №6(58). С. 7-10
5. Грибков А.Б., Соколов В.В., Андриянова Е.А., Петропавловский И.А. Влияние условий процесса гранулирования на физические свойства



фосфатов аммония // Современные тенденции в производстве и применении фосфорсодержащих удобрений и неорганических кислот: Материалы Международной научно-практической конференции 26 мая 2015г. М.: 2015. С. 81-86.

6. Криушин Д.В., Кривонос В.А., Козырь О.Ф., Соколов В.В. Математическая модель влияния внешнего ретурна на процесс гранулирования аммофоса в барабанном грануляторе-сушилке // Инженерный вестник Дона. 2020. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6296](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6296)

7. Файрахманов Р.А., Полевщиков И.С. Моделирование и автоматизация процесса управления формированием профессиональных умений и навыков оператора производственно-технологической системы // Инженерный вестник Дона. 2014. № 4-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2705](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2705)

8. Кривонос В.А., Козырь О.Ф. Программный тренажер операторов технологического процесса в производстве экстракционной фосфорной кислоты // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021668611, 18.11.2021. Заявка № 2021668075 от 12.11.2021.

9. Bell B.S., Kanar A.M., Kozlowski S.W.J. Current issues and future directions in simulationbased training in North America // The International Journal of Human Resource Management. 2008. Vol. 19, № 8. Pp. 1416–1434.

10. Мартусевич Е.А., Буинцев В.Н., Калашников С.Н. Структура и математические модели информационно-обучающей системы “шихтовщик алюминиевого расплава” // Инженерный вестник Дона. 2019. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5732](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5732)

### References

1. Walker G.M., Powder Technology. 2000. № 107. pp. 282-288
  2. Frantskevich V.S., Vysotskaya N.A., Dvornik A.P. Mehanika. Issledovaniya i innovatsii. 2021. № 14. Pp. 226 - 233
-



3. Adetayo A.A., Litster J.D., Cameron I.T. Cameron Computers & Chemical Engineering. 1995. Vol. 19, № 4. Pp. 383-393
4. Dudka S.V., Toshinskiy V.I. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tehnologiy (ISSN 1729-3774). 2012. Vol. 4, №6(58). Pp. 7-10
5. Gribkov A.B., Sokolov V.V., Andriyanova E.A., Petropavlovskiy I.A. Sovremennye tendentsii v proizvodstve i primeneniі fosforosoderzhashih udobreniy i neorganicheskikh kislot: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 26 maya 2015 g., M.: 2015. pp. 81-86.
6. Kriushin D.V., Krivonosov V.A., Kozyr' O.F., Sokolov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6296](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6296)
7. Fayrahmanov R.A., Polevshikov I.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014. № 4-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2705](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2705)
8. Krivonosov V.A., Kozyr' O.F., Programmnyy trenazher operatorov tehnologicheskogo protsessa v proizvodstve ekstraktsionnoy fosfornoй kisloty [Software simulator for process operators in the production of extraction phosphoric acid]. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM 2021668611, 18.11.2021. Zayavka № 2021668075 ot 12.11.2021.
9. Bell B.S., Kanar A.M., Kozlowski S.W.J. The International Journal of Human Resource Management. 2008. Vol. 19, № 8. Pp. 1416–1434.
10. Martusevich E.A., Buintsev V.N., Kalashnikov S.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5732](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5732)