

Математическая модель влияния внешнего ретур на процесс гранулирования аммофоса в барабанном грануляторе-сушилке

Д.В. Кривушин¹, В.А. Кривоносов¹, О.Ф. Козырь¹, В.В. Соколов²

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

*²Акционерное общество «Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам имени профессора Я.В. Самойлова» (АО «НИУИФ»), Череповец,
Вологодская область*

Аннотация: Рассмотрен процесс гранулирования аммофоса в барабанном грануляторе-сушилке (БГС). Разработана динамическая математическая модель формирования эквивалентного диаметра гранул аммофоса в зависимости от расхода и гранулометрического состава внешнего ретур. Проведено сравнение результатов моделирования с фактическими данными нормальной эксплуатации. Модель предназначена для построения системы стабилизации режима гранулирования.

Ключевые слова: аммофос, ретур, грануляция, гранулометрический состав, барабанный гранулятор-сушилка, моделирование, математическая модель.

Конкуренция на рынке гранулированных минеральных удобрений предъявляет высокие требования к физико-химическим характеристикам готовой продукции. Химический состав удобрений зависит в основном от качества и соотношения исходных компонентов. При стабильном химическом составе главенствующую роль в обеспечении заданных физических характеристик продукции (влажность, прочность, слеживаемость) играет процесс гранулирования и сушки минеральных удобрений.

В данной статье рассматривается технологический процесс производства аммофоса методом нейтрализации экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) аммиаком с последующей грануляцией и сушкой продукта в аппарате БГС (барабанный гранулятор-сушилка). Реакция ЭФК с аммиаком протекает в скоростном аммонизаторе-испарителе (САИ) с получением аммофосной пульпы. Аммофосная пульпа через распыляющую форсунку подается на гранулирование и сушку в БГС, куда также поступает ретур и газообразный теплоноситель из топки. Процесс гранулирования заключается

в том, что в зоне загрузки создается завеса из ретура, на которую напыляется аммофосная пульпа. Капли пульпы контактируют с гранулами ретура в завесе. При этом мелкие частицы ретура укрупняются, окатываются при вращении барабана и подсушиваются в присутствии теплоносителя [1-4].

Ретур состоит из двух потоков гранул аммофоса:

- внутренний ретур – гранулы аммофоса, возвращаемые в зону загрузки обратным шнеком от подпорного кольца, расположенного в центре БГС;

- внешний ретур – мелкие и измельченные в дробилке гранулы аммофоса, возвращаемые в зону загрузки БГС после классификации по размеру на двухситном грохоте выходящего из БГС потока готового продукта.

При постоянном составе и расходе пульпы процесс формирования гранул в БГС зависит от следующих факторов:

- степень диспергации капель пульпы в факеле на выходе из форсунки;
- вязкость пульпы;
- разряжение в аппарате БГС;
- температура и расход теплоносителя из топки;
- расход и гранулометрический состав внешнего ретура.

Подбор формы факела пульпы и степени диспергации капель осуществляется на практике опытным путем. Два эти параметра взаимосвязаны и оказывают значительное влияние на сроки пробега насадки БГС между чистками. Поэтому этот фактор не применяют при оперативном управлении грануляцией. Возможности изменения температуры и расхода теплоносителя также весьма ограничены. Эти параметры должны соответствовать расходу и влажности пульпы в зоне загрузки. Так снижение температуры и расхода теплоносителя может привести к нарушению регламентных показателей прочности, влажности и слеживаемости

продукции. Рост температуры повышает удельный расход природного газа, увеличивает образование и вынос мелких гранул аммофоса с газовым потоком из БГС в систему абсорбции, ведет к росту потерь аммиака гранулами аммофоса. При увеличении разрежения растет эквивалентный диаметр гранул и падает содержание товарной фракции. Также, увеличивается скорость движения частиц внутри БГС. Это может приводить к тому, что будет происходить унос большого количества влажных частиц от зоны подачи теплоносителя. Что, в свою очередь, приведет к увеличению влажности и слеживаемости готового продукта [5, 6]. Кроме того, на процесс гранулообразования оказывает влияние вязкость пульпы. При прочих равных условиях, увеличение значения вязкости пульпы приводит к росту эквивалентного диаметра гранул готового продукта [7-9] и падению содержания товарной фракции, а также увеличению количества внешнего ретура.

Проведенные исследования [5-9] показали, что одним из основных факторов, вызывающим нарушение оптимального режима грануляции, являются колебания расхода и гранулометрического состава внешнего ретура. Такие колебания приводят к существенным изменениям производительности БГС, диаметра гранул аммофоса на его выходе, нарушениям регламентных требований по их влажности и прочности.

Для эффективного управления [10] процессом грануляции необходима математическая модель зависимости среднего эквивалентного диаметра гранул аммофоса на выходе БГС от расхода и эквивалентного диаметра гранул внешнего ретура. Учитывая инерционность БГС, такая модель должна отражать как статические, так и динамические характеристики объекта. При построении модели приняты следующие упрощающие предположения:

– циркуляция внутреннего ретура во входной части барабана БГС от подпорного кольца в зону загрузки постоянна и составляет $G_{\text{рет}}^{\text{внут}} = 300$ т/час;

- в установившемся режиме гранулометрический состав внутреннего ретура совпадает с гранулометрическим составом аммофоса на выходе БГС;
- количество пульпы аммофоса, которое осаждается в БГС на каждой грануле ретура, прямо пропорционально площади поверхности этой гранулы;
- все гранулы ретура имеют форму, близкую к сферической.

Входами математической модели процесса гранулирования пульпы в БГС являются следующие параметры:

- $F_{\text{пул}}$, [м³/час] – расход пульпы в БГС, измеряется непрерывно;
- $\gamma_{\text{пул}}$, [кг/м³] – плотность пульпы контролируется в результате лабораторного экспресс-анализа 1 раз в час;
- $G_{\text{рет}}^{\text{внеш}}$, [т/час] – расход внешнего ретура, измеряется непрерывно;
- гранулометрический состав внешнего ретура, измеряется гранулометром раз в 5 минут. На основе показаний гранулометра вычисляется средний эквивалентный диаметр гранул внешнего ретура – $d_{\text{внеш}}$, [мм].

Выходом модели является [1, 2] средний эквивалентный диаметр $d_{\text{вых}}$ [мм] гранул аммофоса на выходе из барабана БГС, который измеряется 1 раз в час по результатам рассеивания гранул на ситах с разными размерами ячеек.

Структура модели формирования среднего эквивалентного диаметра гранул аммофоса в БГС приведена на рисунке 1.

Модель включает нелинейное статическое звено (НСЗ), которое позволяет рассчитать установившееся значение $d_{\text{вых.уст.}}$ среднего эквивалентного диаметра гранул на выходе БГС после завершения переходных процессов при постоянных значениях всех входных сигналов НСЗ, а также динамические звенья, моделирующие процесс перемешивания и перемещения гранул по пространству барабана БГС.

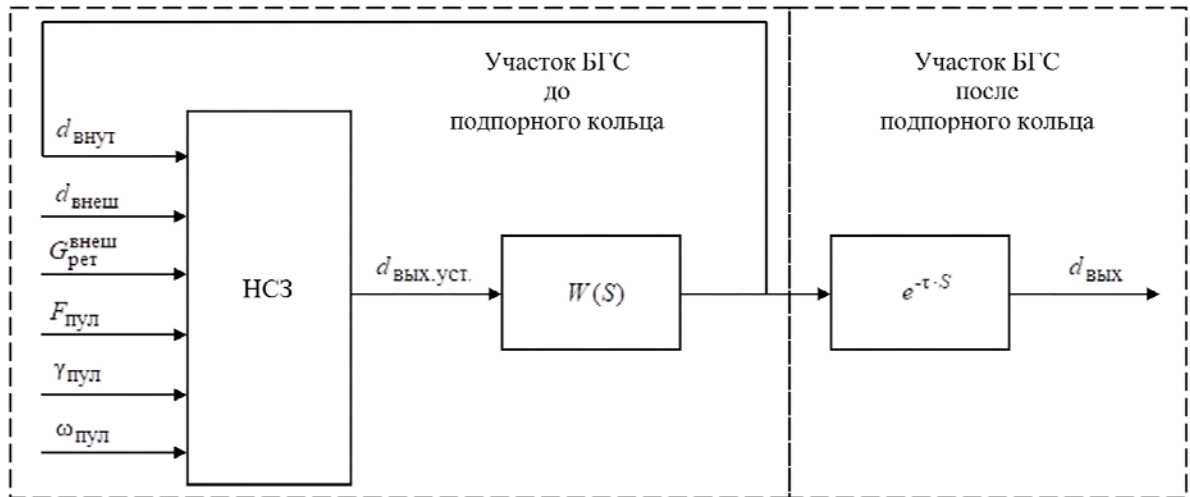


Рис. 1. – Структура модели гранулирования аммофоса в аппарате БГС

$d_{\text{внут}}$ – средний эквивалентный диаметр гранул внутреннего ретура;
 $d_{\text{внеш}}$, $G_{\text{рет}}^{\text{внеш}}$ – средний эквивалентный диаметр и весовой расход внешнего ретура;
 $F_{\text{пул}}$, $\gamma_{\text{пул}}$, $\omega_{\text{пул}}$ – объемный расход, плотность и влажность пульпы;
 $d_{\text{вых.уст.}}$ и $d_{\text{вых}}$ – соответственно, установившееся (расчетная величина), и текущее значения среднего эквивалентного диаметра гранул на выходе

Параметры потока пульпы ($F_{\text{пул}}$, $\gamma_{\text{пул}}$ и $\omega_{\text{пул}}$) позволяют оценить весовой расход $G_{\text{ам}}$ [т/час] аммофоса, который сформируется из пульпы, поступающей в БГС,

$$G_{\text{ам}} = F_{\text{пул}} \cdot \frac{\gamma_{\text{пул}}}{1000} \cdot \left(1 - \frac{\omega_{\text{пул}}}{100} \right)$$

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

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

Заметим, что $d_{\text{внут}}$ является промежуточной переменной, рассчитываемой по модели. В качестве исходного значения $d_{\text{внут}}$ можно принять результат последнего измерения $d_{\text{вых}}$.

Определим объём $V_{1.\text{рет}}$ одной гранулы ретур с учетом её сферической формы, а также количество $n_{\text{рет}}$ гранул, поступающих за 1 час в БГС с потоком $G_{\text{рет}}$ ретур:

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

где $\gamma_{\text{ам}} \approx 1,8 \text{ т/м}^3$ – удельный вес аммофоса.

Тогда на одну гранулу ретур за время однократного прохождения через зону загрузки БГС в среднем напыляется $\Delta G_{1.\text{рет}}$ аммофоса, что увеличивает объём гранулы на $\Delta V_{1.\text{рет}}$:

$$\Delta G_{1.\text{рет}} = \frac{G_{\text{ам}}}{n_{\text{рет}}} = \frac{\pi \cdot G_{\text{ам}} \cdot (d_{\text{рет}})^3 \cdot \gamma_{\text{ам}}}{6 \cdot G_{\text{рет}}}; \Delta V_{1.\text{рет}} = \frac{\Delta G_{1.\text{рет}}}{\gamma_{\text{ам}}} = \frac{\pi \cdot G_{\text{ам}} \cdot (d_{\text{рет}})^3}{6 \cdot G_{\text{рет}}}$$

Новый средний объём гранулы $V_{1.\text{нов}}$ и её новый диаметр $d_{\text{вых.уст.}}$ (см. рис. 1) после прохождения зоны загрузки будут соответственно равны

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

На участке БГС от зоны загрузки до подпорного кольца наблюдается интенсивное перемешивание и циркуляция гранул за счет внутреннего ретур. В качестве модели динамики этого участка будем использовать ячеечную модель, включающую три одинаковых последовательных ячейки с идеальным перемешиванием:

$$W(S) = \frac{1}{(T \cdot S + 1)^3},$$

где постоянная времени $T = \frac{G_{\text{уч.1}}}{3 \cdot (G_{\text{рет}} + G_{\text{ам}})}$; $G_{\text{уч.1}} \approx 45$ т – вес аммофоса,

находящегося в барабане БГС на рассматриваемом участке. Для средних параметров рабочего режима БГС постоянная времени $T = 1,87$ мин.

На участке барабана от подпорного кольца до выхода гранулы аммофоса перемещаются, вытесняя старое содержимое новым. Модель перемещения представлена звеном запаздывания на время τ , где

$\tau = \frac{G_{\text{уч.2}}}{G_{\text{ам}} + G_{\text{рет}}^{\text{внеш}}}$, $G_{\text{уч.2}} \approx 15$ т - вес аммофоса в БГС после подпорного кольца.

Для номинального режима $\tau = 4,9$ мин.

Проведено моделирование процесса формирования гранул на выходе аппарата БГС. Сравнение полученных результатов моделирования с фактическими данными представлены на рис. 2.

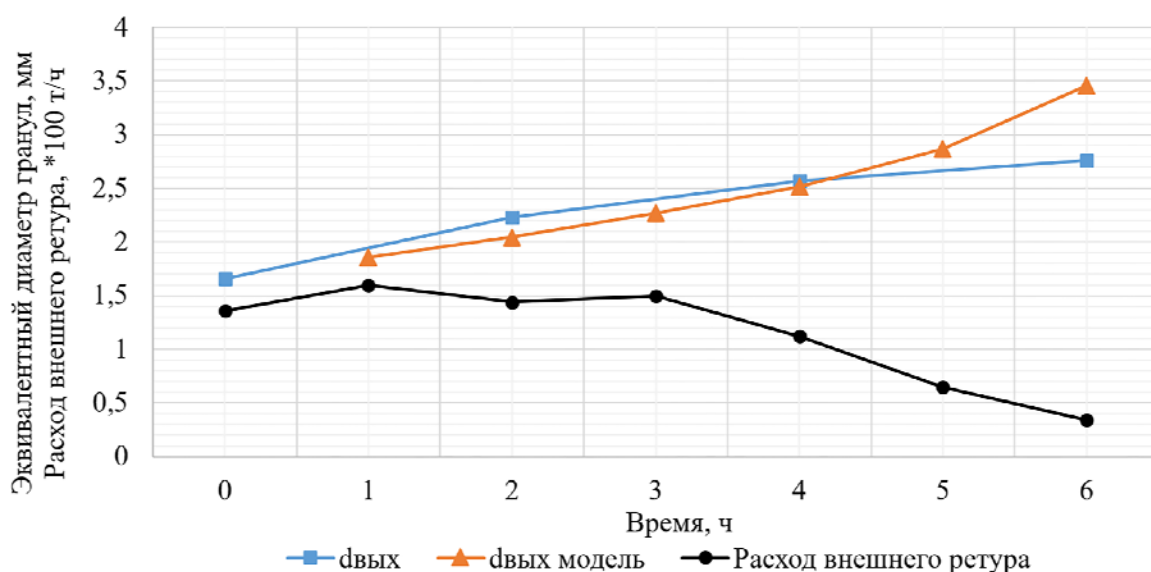


Рис. 2. – Сравнение результатов моделирования с фактическими данными

$d_{\text{вых}}$ и $d_{\text{вых модель}}$ – соответственно фактический и полученный в результате моделирования эквивалентный диаметр гранул на выходе БГС

Из представленного графика видно, что в целом разработанная модель достаточно точно описывает процесс гранулообразования аммофоса в БГС.

Предложенная математическая модель предназначена, в первую очередь, для использования в системе стабилизации режима грануляции в БГС, обеспечения необходимого гранулометрического состава готовой продукции путем изменения расхода потока внешнего ретура и степени дробления гранул аммофоса, возвращаемых в БГС с внешним ретуrom.

Литература

1. Бродский А.А., Эвенчик С.Д. Технология фосфорных и комплексных удобрений / Андреев М.В., Бродский А.А., Забелешинский Ю.А., Зорина Е.А., Кленицкий А.И., Кочетков В.Н., Родин В.И., Эвенчик С.Д.; под ред. Эвенчика С.Д., Бродского А.А. М.: Химия, 1987. 464 с.
2. Классен П.В., Гришаев И.Г. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). М.: Химия, 1982. 272 с.
3. Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И., Каган С.З., Ковалев Ю.Н., Кочаров Р.Г., Кочергин Н.В.; под ред. Дытнерского Ю.И. 2-е изд., перераб. и дополн. изд. М.: Химия, 1991. 496 с.
4. Кочетков В.Н. Гранулирование минеральных удобрений. М.: Химия, 1975. 224 с.
5. 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.
6. 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. / Сост. В.И. Суходолова. М.: 2015. С. 81-86.

7. Walker, G.M., 2000. Drum granulation of NPK fertilizers. *Powder Technology*, 107: pp. 282-288.

8. Walker, G.M., 2001. Prediction of Fertilizer Granulation: Effect of Binder Viscosity on Random Coalescence Model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 40(№ 9): pp. 2128-2133.

9. Adetayo, A.A., J.D. Litster and I.T. Cameron, 1995. Cameron Steady State modelling and simulation of a fertilizer granulation circuit. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 19(№ 4): pp. 383-393.

10. Кривонос В.А., Бабенков В.А. Система управления технологическими параметрами процесса производства экстракционной фосфорной кислоты // Информационные системы и технологии. 2015. № 2 (88). С. 73-80.

References

1. Andreev M.V., Brodskij A.A., Zabeleshinskij Ju.A., Zorina E.A., Klenickij A.I., Kochetkov V.N., Rodin V.I., Jevenchik S.D.; pod red. Jevenchika S.D., Brodskogo A.A. *Tehnologija fosfornyh i kompleksnyh udobrenij [Technology of phosphoric and complex fertilizers]* M.: Himija, 1987. 464 p.

2. Klassen P.V., Grishaev I.G. *Osnovy tehniki granulirovanija (Processy i apparaty himicheskoj i neftehimicheskoj tehnologii) [Basics of granulation technology (Processes and apparatuses of chemical and petrochemical technology)]*. M.: Himija, 1982. 272 p.

3. Borisov G.S., Brykov V.P., Dytnerskiy Yu.I., Kagan S.Z., Kovalev Yu.N., Kocharov R.G., Kochergin N.V.; *Osnovnye processy i apparaty himicheskoj tehnologii: Posobie po proektirovaniju [The main processes and apparatuses of chemical technology: Design Manual]* pod red. Dytnerskogo Ju.I. 2-e izd., pererab. i dopoln. izd. M.: Himija, 1991. 496 p.

4. Kochetkov V.N. Granulirovanie mineral'nyh udobrenij [Granulation of mineral fertilizers]. M.: Himija, 1975. 224 p.
5. Dudka S.V., Toshinskij V.I. Issledovanie processa granuljaccii i sushki v tehnologii udobrenij marki «Superagro N:P 10:40» Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij (ISSN 1729-3774). 2012. Tom 4, №6(58). pp. 7-10.
6. Gribkov A.B., Sokolov V.V., Andriyanova E.A., Petropavlovskiy I.A. Vliyanie usloviy protsessa granulirovaniya na fizicheskie svoystva fosfatov ammoniya. Sovremennye tendentsii v proizvodstve i primenenii fosforsoderzhashchikh udobreniy i neorganicheskikh kislot [tekst]: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 26 maya 2015g. Sost. V.I. Sukhodolova. M., 2015. pp. 81-86.
7. Walker, G.M., 2000. Drum granulation of NPK fertilizers. Powder Technology, 107: pp. 282-288.
8. Walker, G.M., 2001. Prediction of Fertilizer Granulation: Effect of Binder Viscosity on Random Coalescence Model. Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 40(№ 9): pp. 2128-2133.
9. Adetayo, A.A., J.D. Litster and I.T. Cameron, 1995. Cameron Steady State modelling and simulation of a fertilizer granulation circuit. Computers & Chemical Engineering, Vol. 19(№ 4): pp. 383-393.
10. Krivonosov V.A., Babenkov V.A. Sistema upravlenija tehnologicheskimi parametrami processa proizvodstva jekstrakcionnoj fosfornoj kisloty. Informacionnye sistemy i tehnologii. 2015. № 2 (88). pp. 73-80.