

## ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКТА, ДОГРАНУЛИРУЕМОГО ОКАТЫВАНИЕМ ПО ТЕХНОЛОГИИ «FATTENING»

Ю.А. Таран, ассистент, Р.В. Морозов, аспирант

А.В. Таран, старший научный сотрудник, А.Л. Таран\*, заведующий кафедрой

кафедра Процессов и аппаратов химической технологии им. Н.И. Гельперина

МИТХТ им. М.В. Ломоносова, Москва 119571 Россия

\*Автор для переписки, e-mail: capsula2@mail.ru

**В** статье разработана методика расчета гранулометрического состава в процессе догранулирования исходного ретурта окатыванием по технологии «fattening» порошками (со связующим или без) в различных устройствах, включая тарельчатые грануляторы. Знание распределения частиц по размерам очень важно для расчета процесса и планирования производства гранулированных продуктов, таких как удобрения, сера, щелочи и многие другие. Приведены различные варианты решения задачи для непрерывного и периодического (переходного) процесса. Составлена блок-схема решения задачи, а также приведено сравнение результатов с предложенными методиками расчета и экспериментом. Результаты расчета, полученные по моделям, представлены в виде серий графических зависимостей.

**Ключевые слова:** гранулирование, гранулы, гранулометрический состав.

Fattening – процесс послойного нанесения исходного продукта с иными или без компонентами (компонентом) на поверхность гранул внешнего ретурта, реализуемый по технологии окатывания. Наносимый состав может быть в форме расплава, раствора, суспензии, эмульсии, порошка, применяемого с использованием связующего или без него, в аппаратах барабанного, тарельчатого, реже другого типа [1–7]. Технология использовалась нами для решения различных задач: придания поверхности требуемых свойств перед последующим капсулированием, упрочнения гранул, введения добавок, создания многослойных гранул с управляемым выделением компонентов, для укрупнения грансостава и других [1, 5]. Во всех случаях важно знать динамику изменения грансостава.

Для проведения окатывания с практической точки зрения целесообразно использовать аппараты барабанного или тарельчатого типа [1, 5–7]. Первые – предпочтительны и экономически оправданы при производительности порядка 30 т/ч., вторые при производительности примерно 10 т/ч. Однако использование тарельчатых грануляторов позволяет получить более высокое качество покрытия и обеспечить практически безретурный процесс, благодаря сегрегирующему действию тарелки [1, 5, 6]. Процесс может эффективно проводиться как в периодическом, так и в непрерывном режиме [1, 5–7].

Уравнение материального баланса по целевому компоненту для периодического и выхода «на режим» (переходный, неустановившийся процесс) для непрерывного процессов догранулирования может быть записано в виде [4]:

$$\frac{dM}{d\tau} = G_z - G_{zn} + G_{pn}a_n = G_z(1 + \lambda) - \frac{M}{\tau}, \quad (1)$$

где  $G_z$ ,  $G_{zn}$ ,  $G_{pn}$  – массовые расходы исходных гранул, гранулированного продукта и суспензии догранулирующего порошка соответственно, кг/ч;  $a_n$  – концентрация догранулирующей смеси;  $\lambda = \frac{G_{pn}a_n}{G_z}$  – степень догранулирования

исходного ретурта;  $M = G_{zn} \cdot \bar{\tau}$  – масса всех компонентов в аппарате, кг;  $\bar{\tau} = M / G_{zn}$  – среднее время пребывания гранул в аппарате, ч.

Изменение текущей массы  $M(m)$  для гранул массой  $m$  во времени  $\tau$  в аппарате равно:

$$\frac{\partial M(m)}{\partial \tau} = M_z(m) - M_{zn}(m) + \Delta_+ M(m) - \Delta_- M(m), \quad (2)$$

где  $M_r(m) = G_r F_r(m)$  – массовый расход гранул массой от 0 до  $m$ , поступающих в аппарат с исходным ретуром;  $F_r(m)$  – функция распределения по массе гранул исходного ретурта;  $M_{rn}(m) = G_{rn} F_{rn}(m)$  – массовый расход гранул массой от 0 до  $m$ , ушедший из аппарата с догранулированным ретуром (продуктом);  $F_{rn}(m)$  – функция распределения по массе гранул продукта на выходе;

$$\Delta_+ M(m) = M \int_0^m \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - \text{массовый расход}$$

прироста массы гранул массой от 0 до  $m$  за счет их роста при догранулировании с безразмерной скоростью роста массы гранул

$$\bar{v}(m') = \frac{1}{m'} \frac{dm'}{d\tau} [c]^{-1}; \frac{dF(m')}{dm'} = f(m') - \text{текущая}$$

плотность распределения по массе ( $m'$ ) гранул продукта в ходе догранулирования;

$$\Delta_- M(m) = M \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m - \text{массовый расход}$$

гранул, масса которых в результате роста стала

больше ( $m$ ) и они «выбыли» из пространства масс, принадлежащего интервалу  $0-m$ ;  $\frac{dF(m)}{dm} = f(m)$  – искомая плотность распределения по массе ( $m$ ) гранул продукта в ходе догранулирования.

После подстановки приведенных соотношений в уравнение (2) получим:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [M \cdot F(m)] = G_2 F_2(m) - G_{2n} F_{2n}(m) + M \int_0^{m-} \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - M \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m. \quad (3)$$

или:

$$M \frac{\partial F(m)}{\partial \tau} + F(m) \frac{\partial M}{\partial \tau} = M \frac{\partial F(m)}{\partial \tau} + F(m)(G_2 + G_{pn} a_n - G_{2n}) = M \frac{\partial F(m)}{\partial \tau} + F(m) \left[ G_2(1 + \lambda) - \frac{M}{\tau} \right] = G_2 F_2(m) - G_{2n} F_{2n}(m) + M \int_0^{m-} \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - M \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m. \quad (4)$$

Преобразуем (4):

$$M \frac{dF(m)}{d\tau} = G_2 F_2(m) - G_2(1 + \lambda) F(m) - G_{2n}(F_{2n}(m) - F(m)) + M \int_0^{m-} \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - M \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m. \quad (5)$$

Из уравнения (5) получим уравнение для расчета динамики изменения распределений по массе при выходе процесса на стационарный режим:

$$\frac{dF(m)}{d\tau} = \frac{1}{\psi \cdot \tau} F_2(m) - \frac{1}{\psi \cdot \tau} (1 + \lambda) F(m) - \frac{1}{\tau} (F_{2n}(m) - F(m)) + \int_0^{m-} \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m, \quad (6)$$

где  $\psi = G_{2n}/G_n$  – степень догранулирования.

Уравнение (6) можно решать численно:

$$\frac{\Delta F(m)}{\Delta \tau} = \frac{1}{\psi \cdot \tau} F_2(m) - \frac{1}{\psi \cdot \tau} (1 + \lambda) F(m) - \frac{1}{\tau} (F_{2n}(m) - F(m)) + \sum_{j=1}^J \left[ \bar{v}(m') \frac{\Delta F(m'_j)}{\Delta m'_j} \Delta m'_j \right] - \bar{v}(m) \frac{\Delta F(m_j)}{\Delta m_j} m_j, \quad (7)$$

где  $\Delta$  – разностный аналог первой производной;  $m = \Delta m'_j \cdot J$ .

В стационарном случае (после выхода на режим непрерывного процесса)  $\frac{dM}{d\tau} = 0$  или

при малой скорости догранулирования, например капсулирование  $\frac{dM}{d\tau} \rightarrow 0$ , из (1) получаем  $G_2(1 + \lambda) = G_{2n}$  и  $F_{2n}(m) = F(m)$ .

Тогда, так как  $\frac{dF(m)}{d\tau} = 0$ , распределение гранул по массе, а, следовательно, и по размерам перестает меняться во времени, уравнение (5) принимает вид:

$$\frac{G_{2n}}{1 + \lambda} F_2(m) - G_{2n} F(m) + M \int_0^{m-} \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - M \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m = 0. \quad (8)$$

$$\frac{1}{(1 + \lambda)\tau} F_2(m) - \frac{1}{\tau} F(m) + \int_0^{m-} \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m = 0. \quad (9)$$

в конечных разностях:

$$\frac{1}{(1 + \lambda)\tau} F_2(m) - \frac{1}{\tau} F(m) + \sum_{j=1}^J \left[ \bar{v}(m') \frac{\Delta F(m'_j)}{\Delta m'_j} \Delta m'_j \right] - \bar{v}(m) \frac{\Delta F(m)}{\Delta m_j} m_j = 0, \quad (10)$$

$m = \Delta m'_j \cdot J$

Для всего распределения ( $0 < m < \infty$ )  $F_2(m) \rightarrow 1$ ;  $F(m) \rightarrow 1$ ;  $\frac{dF(m)}{dm} \rightarrow 0$ , тогда из (9) получим:

$$-\frac{\lambda}{1 + \lambda} \cdot \frac{1}{\tau} + \int_0^{\infty-} \bar{v}(m') f(m') dm' = 0. \quad (11)$$

Разностный аналог этого уравнения:

$$-\frac{\lambda}{1 + \lambda} \frac{1}{\tau} + \sum_{j=1}^J \bar{v}(m') \frac{\Delta F(m)}{\Delta m} \Delta m = 0. \quad (12)$$

Из уравнения (12) для приблизительных оценок можно получить связь между  $\lambda$  и  $\tau$ , ограничиваясь единственным членом суммы  $\sum_{j=1}^J \bar{v}(m) \frac{\Delta F(m)}{\Delta m} \Delta m$ . Приближенно получаем:

$$\tau = \left[ \frac{\bar{v}(m)(1 + \lambda)}{\lambda} \right]^{-1}. \quad (13)$$

Уравнения (9) и (11) или их разностные аналоги (10) и (12), а для простоты (13), необходимо решать совместно. Из уравнения (9) или (10) находим плотность распределения  $f(m)$ , а из уравнения (11) или (12), а для простоты (13), – связь  $\tau$  и  $\lambda$  и, если она не совпадает с заданной, итерационно уточняем плотность распределения  $f(m)$ , до совпадения с заданным соотношением между  $\tau$  и  $\lambda$ .

Продифференцируем уравнение (9) по (m). Получим дифференциальное уравнение для расчета плотности распределения на момент выхода процесса догранулирования на стационарное распределение по массе:

$$\frac{1}{(1+\lambda)\tau} f_2(m) - \frac{1}{\tau} f(m) - m \frac{d}{dm} [v(m)f(m)] = 0. \quad (14)$$

Уравнение (14) можно решать численно:

$$\frac{1}{(1+\lambda)\tau} f_2(m) - \frac{1}{\tau} f(m) - m \frac{\Delta[v(m)f(m)]}{\Delta m} = 0. \quad (15)$$

Определим безразмерную скорость роста массы гранулы как:

$$\bar{v}(m') = \frac{1}{m'} \frac{dm'}{d\tau} = \frac{1}{m'^{1/3}} \frac{dm'^{1/3}}{d\tau}.$$

Ранее нами отмечалось [1, 8], что в случае догранулирования порошком, можно считать

$$v_{\bar{v}} = \frac{dr}{d\tau} = const, \quad \text{откуда: } \frac{dm'^{1/3}}{d\tau} \cong K' \frac{dr}{d\tau} = K = const,$$

тогда:

$$\bar{v}(m) = \frac{1}{m^{1/3}} \frac{dm^{1/3}}{d\tau} = \frac{K}{m^{1/3}}. \quad (16)$$

Подставим (16) в (14) и получим:

$$\frac{1}{(1+\lambda)\tau} f_2(m) - \frac{1}{\tau} f(m) - Km \frac{d}{dm} \left( \frac{f(m)}{m^{1/3}} \right) = 0. \quad (17)$$

Для численного решения уравнения (17) можно использовать разностный аналог:

$$\frac{1}{(1+\lambda)\tau} f_2(m) - \frac{1}{\tau} f(m) - K \Delta \left( \frac{f(m)}{m^{1/3}} \right) / \Delta m = 0, \quad (18)$$

а из уравнения баланса по всему распределению (12)  $0 \leq m \leq \infty$  с подстановкой в него (18) имеем:

$$-\frac{\lambda}{1+\lambda} \frac{1}{\tau} + K \int_0^{\infty} \frac{1}{m^{1/3}} f(m') dm' = 0, \quad (19)$$

которое можно решать численно, используя его разностный аналог:

$$-\frac{\lambda}{1+\lambda} \frac{1}{\tau} + K \sum_{j=1}^J \frac{1}{m_j^{1/3}} f(m') \Delta m' = 0. \quad (20)$$

Уравнения (17) и (19) необходимо решать совместно. Из (17) при заданных степени догранулирования и среднем времени пребывания в аппарате получаем плотность распределения массы продукта по массе гранул  $f(m)$ , а из (19) получаем связь между  $\lambda$  и  $\tau$  и, если она не совпадает с заданной, итерационно уточняем

плотность распределения  $f(m)$  до совпадения задаваемых значений с допустимой погрешностью.

Задача (17)–(19) имеет аналитическое решение [4], для этого она переписывается в виде:

$$\frac{\eta}{1+\lambda} f_2(\mu) - \eta f(\mu) - \mu \frac{d}{d\mu} \left( \frac{f(\mu)}{\mu^{1/3}} \right) = 0. \quad (21)$$

$$-\frac{\lambda\eta}{1+\lambda} + \int_0^{\infty} \frac{1}{(\mu')^{1/3}} f(\mu') d\mu' = 0, \quad (22)$$

где  $\mu = m/m_0$  – отклонение текущей массы от

средней,  $\eta = \frac{(m_0)^{1/3}}{K} \cdot \frac{1}{\tau}$  – отношение обратной

величины средней безразмерной скорости роста массы гранулы к среднему времени пребывания.

Решение в квадратурах задачи (21)–(22) имеет вид [4]:

$$f(\mu) = \frac{\eta(\mu)^{1/3}}{1+\lambda} e^{-3\eta(\mu)^{1/3} \int_0^{\mu} \frac{f_2(\mu')}{(\mu')^{1/3}} d\mu'} e^{3\eta(\mu')^{1/3}} d\mu'. \quad (23)$$

Или в конечных разностях:

$$f(\mu) = \frac{\eta(\mu)^{1/3}}{1+\lambda} e^{-3\eta(\mu)^{1/3} \times} \times \sum_{j=1}^J \frac{f_2(\mu_j)^{1/3}}{(\mu_j)^{1/3}} e^{3\eta(\mu_j)^{1/3}} \Delta\mu_j, \quad (24)$$

где  $\mu = J \cdot \Delta\mu_j$ .

Описанные задачи мы решали, используя разностные аналоги уравнений (5) или (6), (9), (11), (13), (17)–(19).

Ниже приведена блок-схема алгоритма решения задачи (рис. 1).

Сравнение показателей прочности приллированных и догранулированных гранул дано в таблице [1].

Показатели прочности приллированных и догранулированных гранул

	Приллированные с предложенными [1] добавками	Догранулированные
Селитра аммиачная	15-18 Н/гран.	26-36 Н/гран.
Карбамид	8-10 Н/гран.	26-30 Н/гран.

Результаты расчетов для выхода процесса на стационарный режим представлены на рис. 2, 3.

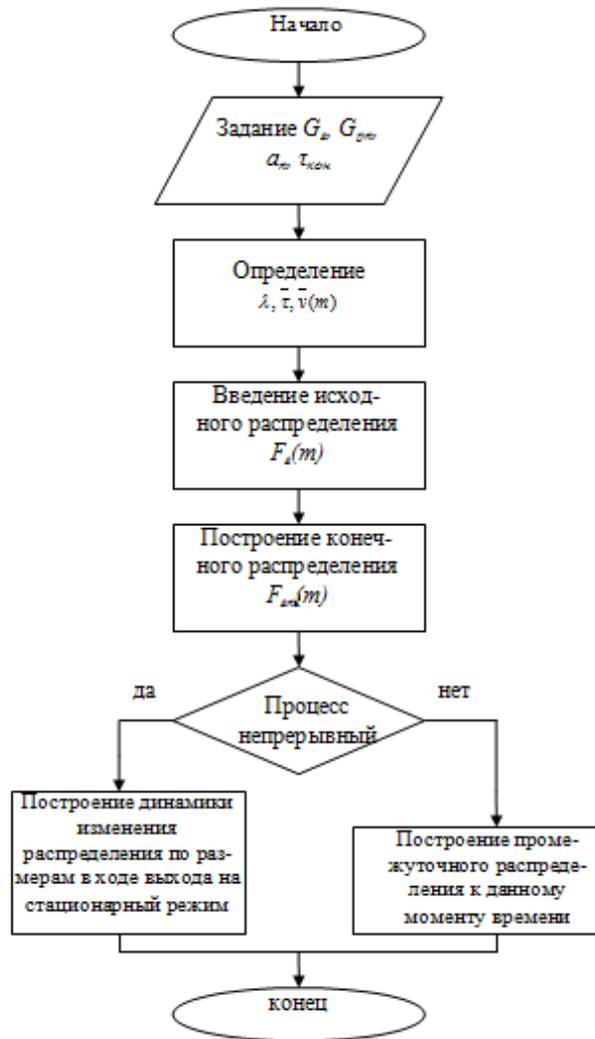


Рис. 1. Блок-схема алгоритма реализации задачи.

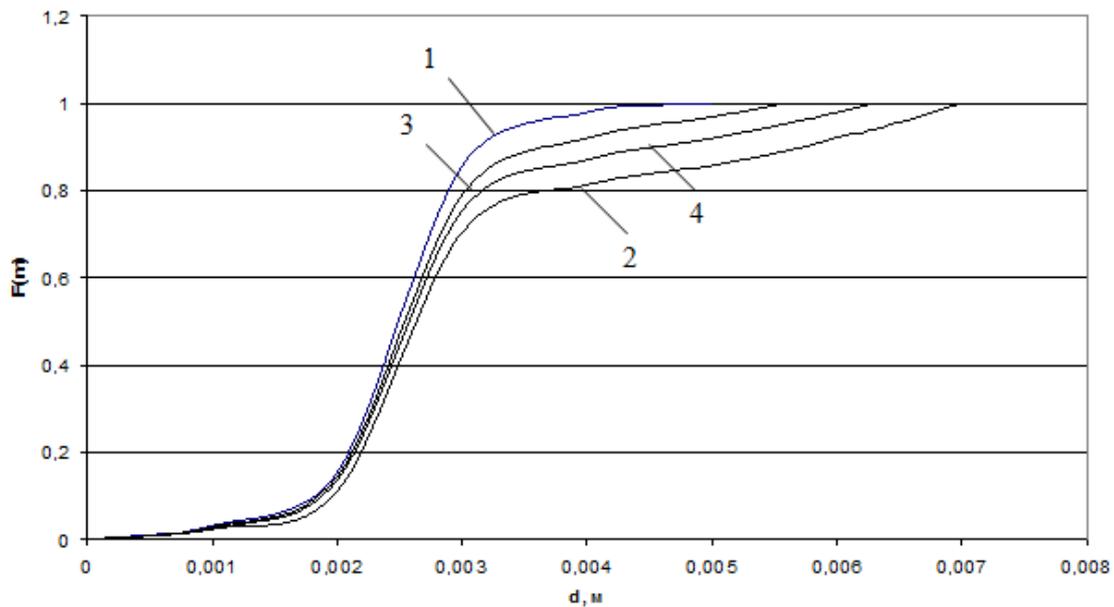


Рис. 2. Кривая распределения гранул аммиачной селитры по размерам при догранулировании окатыиванием: 1 – исходное распределение по ГОСТ 2-85; 2 – конечное распределение (время – 1 ч, степень догранулирования 40 %); 3, 4 – переходный процесс (время – 20 и 40 мин, соответственно).  
Линейная скорость роста гранул  $v_n=4 \cdot 10^{-5}$  м/с.

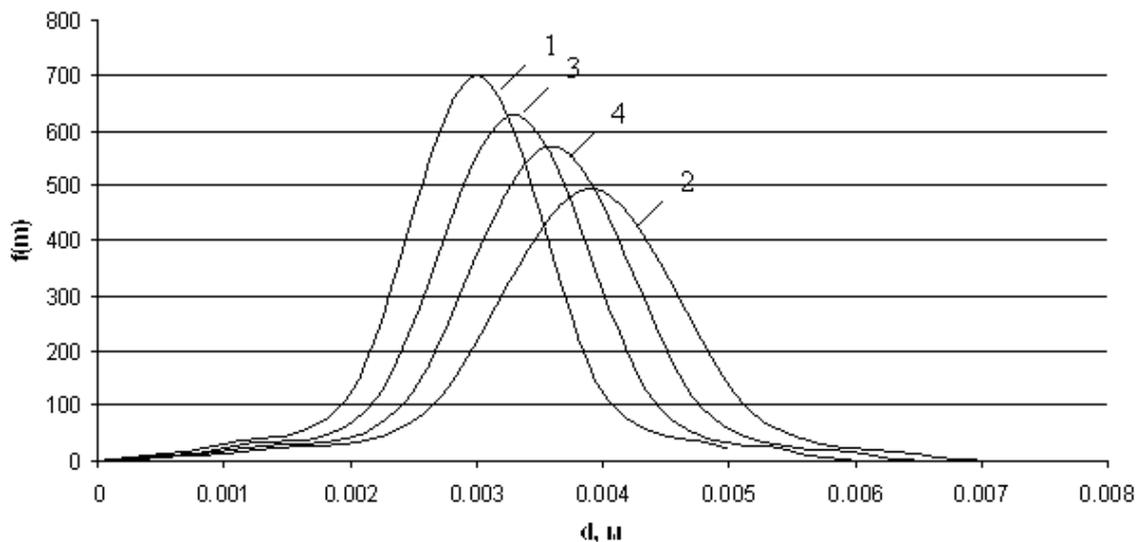


Рис. 3. Плотность распределения гранул аммиачной селитры по размерам при догранулировании окатыванием: 1 – исходное распределение по ГОСТ 2-85; 2 – конечное распределение (время – 1 ч, степень догранулирования 40 %); 3, 4 – переходный процесс (время – 20 и 40 мин, соответственно).  
 Линейная скорость роста гранул  $v_d=4 \cdot 10^{-5}$  м/с.

На рис. 4 приведено сравнение результатов ранее предложенного расчета по [4] и проведенных нами численных расчетов.

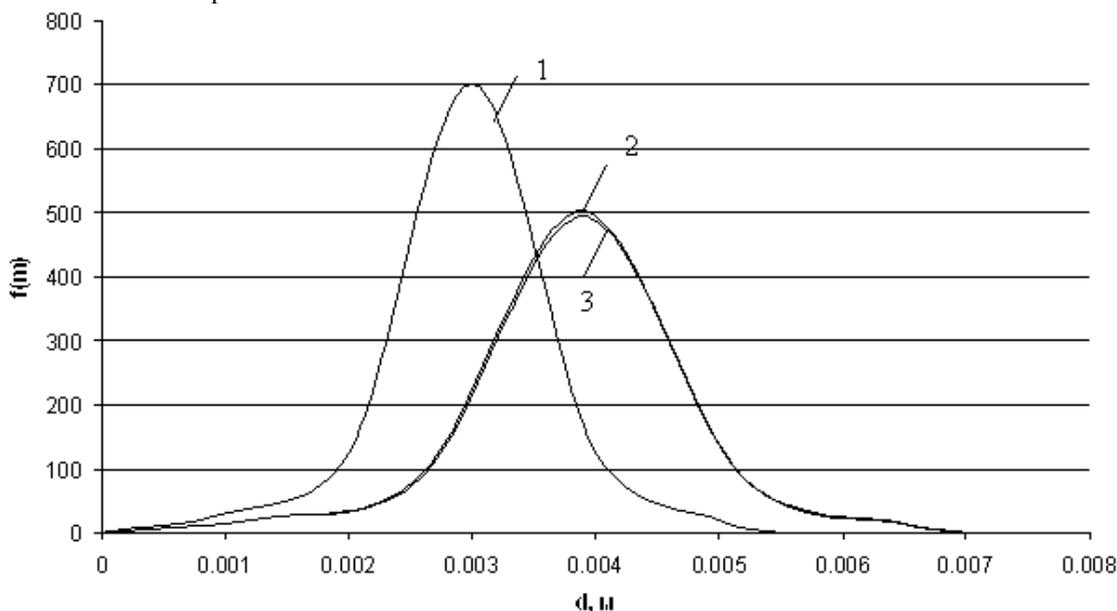


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов различными способами: 1 – исходная плотность распределения по ГОСТ 2-85; 2 – конечная плотность распределения по уравнению (24); 3 – конечная плотность распределения для времени процесса – 1 ч, полученная нами численным решением уравнения (15) (разностного аналога уравнения (14)), с учетом (12) (разностного аналога уравнения (11)).  
 Линейная скорость роста гранул  $v_d=4 \cdot 10^{-5}$  м/с.

Уравнения (12) и (15) или (23) необходимо решать совместно с уравнением (16). Определение скорости роста гранул  $v_d$ , закладываемой в (16), было исследовано нами в [1, 8]. В настоящее время нами проводятся аналогичные исследования и для учета разрушения (истирания) гранул (с отрицательной скоростью роста  $v_d$ ).

На рис. 5 приведено сравнение расчетов по различным предложенным нами формулам (9), (10) и (11), (12); (17), (18) и (19), (20). Можно видеть, что результаты расчетов отличаются незначительно, как для расчетов по рассмотренным формулам, так и по сравнению с предложенным ранее [4] решением (23) и его разностным аналогом (24).

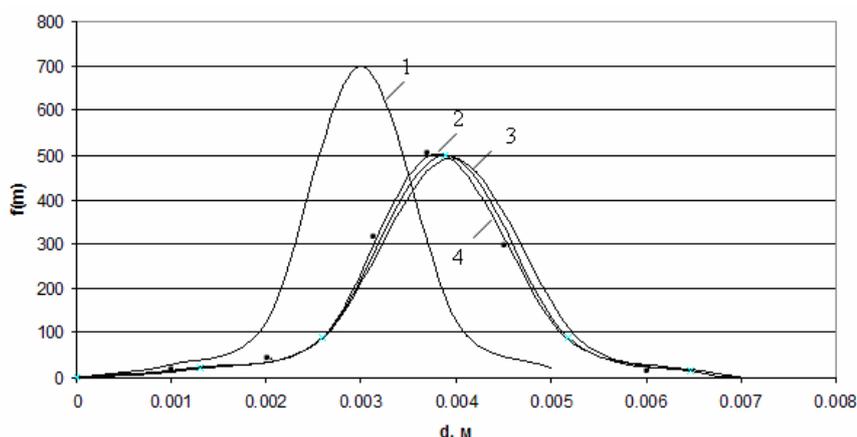


Рис. 5. Сравнение результатов расчетов различными способами: 1 – исходная плотность распределения по ГОСТ 2-85; 2 – конечная плотность распределения по уравнениям (9), (10) для времени процесса – 1 ч; 3 – конечная плотность распределения по уравнениям (17), (18) и (19), (20); точки – эксперимент на опытно-промышленной установке, производительностью 2.5 т/ч. Линейная скорость роста гранул  $v_r=4 \cdot 10^{-5}$  м/с.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Таран А.Л. Теория и практика процессов гранулирования расплавов и порошков: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИТХТ, 2001. 487 с.
2. Таран А.Л., Конохова Н.В., Кучинский В.Е., Таран Ю.А., Яковлев Д.С., Кузина Д.А., Титова И.П. Предложения по реконструкции агрегатов производства аммиачной селитры под производство пористой аммиачной селитры и аммиачной селитры с наполнителями // Вестник МИТХТ. 2009. Т. 4. № 6. С. 40–44.
3. Таран А.Л., Конохова Н.В., Кучинский В.Е., Таран Ю.А., Яковлев Д.С., Кузина Д.А. Принципы реконструкции агрегатов производства аммиачной селитры под производство аммиачной селитры с наполнителями и пористой аммиачной селитры // Хим. промышленность сегодня. 2011. № 8. С. 17–22.
4. Муратов О.В., Флисюк О.М., Фролов В.Ф., Бех-Иванов А.Д. Моделирование процесса гранулирования из растворов во взвешенном слое с внешним рециклом // Теор. основы хим. технологии. 2010. Т. 44. № 4. С. 431–434.
5. Таран Ю.А. Разработка и анализ процессов гранулирования расплавов с использованием экологически безопасных энергосберегающих схем: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИТХТ, 2011. 254 с.
6. Классен П.В., Гришаев И. Г. Основные процессы технологии минеральных удобрений. М.: Химия, 1990. 304 с.
7. Иванов А.Б., Рустамбеков М.К., Кузнецова В.В. К расчету потоков при гранулировании минеральных удобрений в аппаратах барабанного типа // Теор. основы хим. технологии. 2002. Т. 36. № 6. С. 652–657.
8. Таран А.Л., Морозов Р.В., Таран Ю.А., Таран А.В. О механизме роста и дробления гранул при гранулировании порошкообразных материалов // Сб. Трудов I-ой Всерос. заочной научно-практ. конф. «Новые технологии в промышленности и сельском хозяйстве». Бийск, декабрь 2012. С. 381–384.

## CHANGES IN THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF A PRODUCT OVERGRANULATED BY BALLING WITH THE USE OF "FATTENING" TECHNOLOGY

**Yu.A. Taran, R.V. Morozov, A.V. Taran, A.L. Taran<sup>@</sup>**

*M.V. Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Moscow, 119571 Russia*

*<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: capsula2@mail.ru*

*In the paper we present the method of calculating the particle size distribution of the initial granules overgranulated by the "fattening" technology. We have developed a number of different ways for solving the problem for the continuous and periodic (transition) process. Knowing the particle size distribution is very important for calculating and planning the production of granulated products, such as fertilizers and many others. Fattening is a process of overgranulating the initial pellet by the powder (with or without binding) by rolling in different devices, including plate granulators. The calculation results obtained with the use of the models are represented as a series of graphic dependencies. A comparison of the proposed calculation methods with those previously known is also given. A block diagram of the implementation of the algorithm is also presented in the paper.*

**Keywords:** granulation, granules, particle size distribution.