

РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ ПОРОШКА СО СТЕАРАТОМ ЦИНКА

Хохленков М.Е.¹, Сизов С.И.², Ефремов Е.В.³, Фейгин А.И.⁴

¹Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ), гр. 0701, email: meh2@tpu.ru

²ТПУ, ИЯТШ, инженер-исследователь, email: sis17@tpu.ru;

³ТПУ, ИЯТШ, доцент, email: efremov@tpu.ru;

⁴АО «Прорыв», и.о. начальника отдела ИТ, email: feygin-ai@mail.ru

Введение

Современные технологии позволяют создавать виртуальные модели производственных систем, что дает возможность выбирать оптимальные режимы работы и проводить эксперименты без риска повреждения оборудования. Это также позволяет оптимизировать износ и вероятность выхода из строя элементов системы.

В рамках проекта «Прорыв», реализуемого госкорпорацией «Росатом», сотрудниками Отделения ядерно-топливного цикла ТПУ разрабатывается программный комплекс «Код оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП)». Код предназначен для имитации работы технологических схем замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) с целью исследования работоспособности, управляемости и оптимизации как отдельных процессов, узлов и установок, так и технологических схем в целом.

Одним из технологических процессов ЗЯТЦ является перемешивание смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП-топливо) со стеаратом цинка. Поэтому возникла необходимость создания в КОД ТП модуля имитации процесса смешивания порошка со стеаратом цинка.

Смешивание со стеаратом цинка происходит в аппарате усреднения (рис. 1). В аппарат с усреднённым гранулятом добавляется необходимое количество стеарата цинка, который является пластификатором в процессе дальнейшего спекания таблеток. Установка приводится во вращение и происходит перемешивание гранулята с частицами стеарата цинка, а также их прилипание к гранулам. На выходе получается пресс-порошок, из которого впоследствии изготавливают топливные таблетки.



Рис. 1. Смешивание со стеаратом цинка в схеме фабрикации СНУП-топлива

Модель процесса смешения со стеаратом

Анализ литературы [1–4] показал, что при математическом описании процессов перемешивания обычно в качестве входных выбирают размеры частиц, их массовые доли, параметры установки (размер, скорость вращения и т. д.), а в качестве выходных – коэффициент налипания/смешения. Поэтому при создании модели процесса производства пресс-порошка в качестве входных были выбраны (рис. 2): частота вращения контейнера (f), размеры гранул ($d_1...d_k$), относительные доли их содержания в грануляте ($n_1...n_k$), размеры частиц стеарата цинка ($d_{1c}...d_{kc}$), относительные доли их содержания ($n_{1c}...n_{kc}$), плотность гранулы (ρ), плотность частицы стеарата цинка (ρ_c), конструктивный коэффициент установки (k), а в качестве выходной – коэффициент налипания K_n , который численно равен отношению площади гранул, покрытых частицами стеарата цинка к общей площади гранул.



Рис. 2. Информационная схема модели процесса смешивания со стеаратом цинка

В качестве основы было принято взять ранее разработанную и внедренную в КОД ТП модель процесса усреднения, дополнив ее следующими соотношениями.

На основании [2, 6] расчет коэффициента налипания K_H производится по формуле:

$$K_H = \frac{S_{\text{нал.}}}{S_{\text{общ.}}} = \left(\left(\frac{W_{\text{действ.}}}{W_{\text{необх.}}} \right) \left(\frac{1}{1 + e^{k \left(\frac{W_{\text{действ.}}}{W_{\text{необх.}}} - 1 \right)}} \right) \right) (1 - e^{-\alpha t}), \quad (1)$$

где $S_{\text{нал}}$ – площадь гранулята, покрытая стеаратом цинка;

$S_{\text{нал}}$ – площадь гранулята;

$W_{\text{необх.}}$ – массовая доля стеарата цинка, необходимая для полного покрытия гранулята;

$W_{\text{действ.}}$ – массовая доля стеарата цинка, фактически добавленная в аппарат;

k – конструктивный коэффициент;

α – константа скорости смешения.

Для расчёта массовой доли стеарата цинка, необходимой для покрытия всех гранул частицами стеарата цинка было решено воспользоваться формулой [3, 5]:

$$w = \frac{N \cdot d^3 \cdot \rho_{\text{ст.}}}{D^3 \cdot \rho_{\text{гр.}} + N \cdot d^3 \cdot \rho_{\text{ст.}}}, \quad (2)$$

где N – количество частиц стеарата цинка, необходимое для покрытия одной гранулы;

D – диаметр частиц гранулята;

d – диаметр частиц стеарата цинка;

$\rho_{\text{гр.}}$ – плотность гранулы;

$\rho_{\text{ст.}}$ – плотность частицы стеарата цинка.

Для расчёта количества частиц стеарата, покрывающих одну гранулу, было решено воспользоваться формулой, отражающей зависимость количества частиц стеарата цинка от размерности гранулы и частиц стеарата цинка.

$$N = \frac{4(D+d)^2}{d^2}, \quad (3)$$

где D – диаметр частиц гранулята;

d – диаметр частицы стеарата цинка;

N – количество частиц стеарата цинка, находящихся в контакте с гранулой.

Программная реализация

К моменту создания модели процесса смешения порошка со стеаратом цинка в программном комплексе КОД ТП уже была частично реализована модель работы аппарата усреднения. И она, и КОД ТП в целом были разработаны с использованием фреймворка Qt C++. По этим причинам именно это ПО было решено применить при программной реализации разрабатываемой модели. А так как и усреднение гранулята, и его смешение со стеаратом цинка производится в одном и том же технологическом аппарате, то рациональным являлось реализовать модель смешения, модернизировав существующую модель усреднения.

Для этого в нее был введен класс «AddStZn» (см. рис. 3, а), который определяет статус операции смешивания со стеаратом. Кроме того, был дополнен класс «Averaging», отвечающий за расчёт процесса усреднения. В него вошли методы, позволяющие производить расчёт среднего диаметра частиц, расчёт коэффициента налипания и расчёт риска производства некачественного гранулята. Также был дополнен класс «Batch», в котором хранится информация о партиях продукта. Были добавлены поля ввода данных о пресс-порошке, получаемом после процесса смешивания со стеаратом цинка.

Алгоритм работы программы при прохождении производственного цикла следующий: после завершения процесса усреднения, происходит перемещение контейнера в пробоотборник, где берётся проба и отправляется на анализ в лабораторию. В случае положительного результата контейнер перемещается обратно в установку усреднения. Вызывается модель смешения со стеаратом цинка, в которой вычисляются входные параметры и запускается цикл расчёта коэффициента налипания. Текущие данные о состоянии продукта записываются в структуре Batch, в которой хранятся характеристики

пресс-порошка. После смешивания со стеаратом берётся проба и отправляется на анализ в лабораторию. После получения положительного результата, контейнер отправляется дальше по технологической линии.

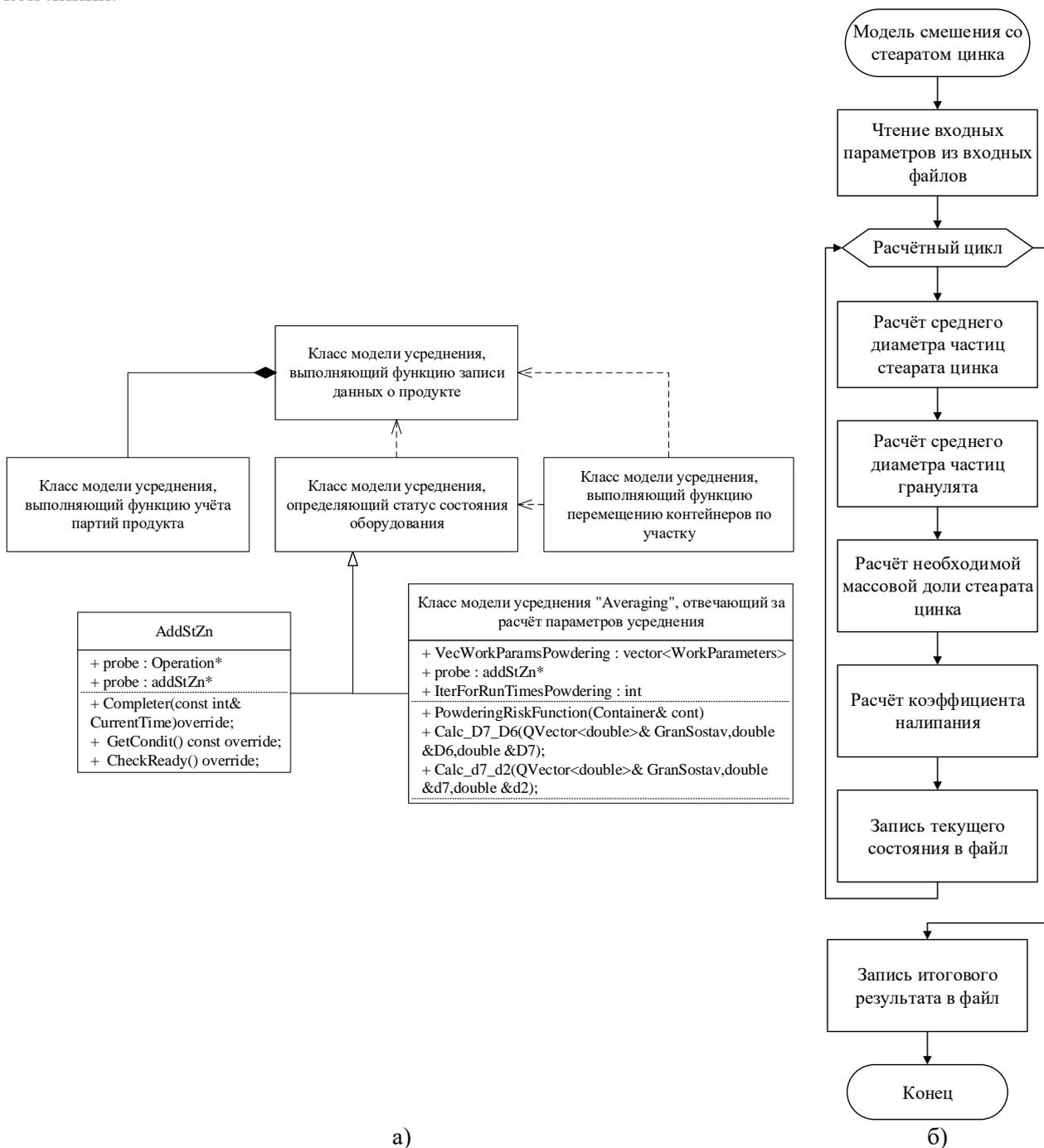


Рис. 3. Схема алгоритма модели смешения со стеаратом цинка

Для расчёта коэффициента налипания использовались входные параметры:

- постоянные (заданные пользователем; нельзя изменить во время работы);
- переменные (считываются из файла во время работы);
- параметры поступающего на смешение со стеаратом цинка продукта (параметры частиц гранулята).

Для тестирования программы были дополнены функции, которые выполняют экспорт данных о состоянии объектов системы в формате JSON и запись состояния объекта и сохранение его в файле в

формате JSON. В них были определены дополнительные поля для чтения и записи параметров смешивания со стеаратом.

Для визуальной оценки зависимости коэффициента налипания от времени, были построены графики при различных входных параметрах.

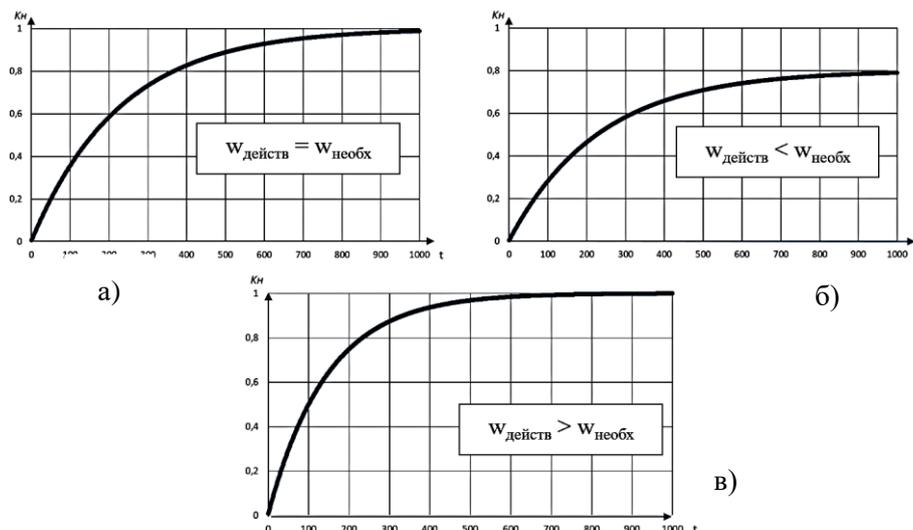


Рис. 4. Зависимость распределения размеров гранул от различных параметров

В случае, если действительная доля стеарата равнялась необходимой (рис. 4, а), значение коэффициента налипания стремилось к единице, поскольку частиц стеарата цинка достаточно для покрытия всех гранул. При уменьшении количества частиц стеарата цинка (рис. 4, б) не достигалось полное покрытия гранул, так как частиц стеарата недостаточно для их полного покрытия. Однако с течением времени все частицы стеарата цинка покрывали гранулы и коэффициент налипания принимал постоянное значение. При увеличении количества стеарата цинка (рис. 4, в) значение коэффициента налипания стремилось к единице, однако в данном случае процесс смешения протекал быстрее.

Заключение

В результате проведенных исследований был проанализирован подход к описанию процесса смешивания со стеаратом, разработано математическое описание данного процесса, разработана модель имитации работы участка покрытия стеаратом цинка. Результаты данного исследования могут быть использованы для оптимизации производственных процессов и повышения эффективности работы промышленных предприятий, использующих похожие установки.

Список использованных источников

1. Dry mixing and coating of powders. – Текст : электронный. – URL: https://www.researchgate.net/publication/45259158_Dry_mixing_and_coating_of_powders.
2. Modeling the mean interaction forces between powder particles. – Текст : электронный. – URL: <https://hal.science/hal-00409939/document>.
3. Mechanical Methods for Dry Particle Coating Processes and Their Applications in Drug Delivery and Development // Recent Patents on Drug Delivery & Formulation. – 2010. V4. – № 1 – P. 58–81. .
4. Закономерности Измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. – Текст : электронный. – URL: https://www.studmed.ru/andreev-s-e-tovarov-v-v-perov-v-a-zakonomernosti-izmelcheniya-i-ischislenie-harakteristik-granulometricheskogo-sostava_b4187c5c6a0.html.
5. Functionalised particles using dry powder coating in pharmaceutical drug delivery: promises and challenges. – Текст : электронный. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/78896815.pdf>.
6. Dry Particle Coating for Improving the Flowability of Cohesive Powders. – Текст : электронный. – URL: https://www.researchgate.net/publication/228408784_Dry_Particle_Coating_for_Improving_the_Flowability_of_Cohesive_Powders.