



УДК 66.096.5

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF FLUIDIZED BED GRANULATION

Васильев Пётр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Процессы и аппараты химических
и пищевых производств»
Волгоградский государственный технический университет
nestorvv@mail.ru

Павлова Екатерина Андреевна

студент кафедры «Процессы и аппараты химических
и пищевых производств»,
Волгоградский государственный технический университет
e.pavlova1999@icloud.com

Шаин Андрей Александрович

студент кафедры «Процессы и аппараты химических
и пищевых производств»,
Волгоградский государственный технический университет
andreyb.00@mail.ru

Аннотация. В работе предложена уточнённая методика и пример расчёта гранулятора кипящего слоя, работающего в максимально энергоэффективном технологическом режиме.

Ключевые слова: гранулятор, кипящий слой, удельная поверхность, форма и шероховатость поверхности.

Vasilyev Pyotr Sergeevich

Ph. D., Associate Professor of the Department
«Processes and Apparatus of Chemical
and Food Production»,
Volgograd State Technical University
nestorvv@mail.ru

Pavlova Ekaterina Andreevna

Student of the Department «Processes and
Apparatus of Chemical and Food Production»,
Volgograd State Technical University
e.pavlova1999@icloud.com

Shain Andrey Alexandrovich

Student of the Department «Processes and
Apparatus of Chemical and Food Production»,
Volgograd State Technical University
andreyb.00@mail.ru

Annotation. The paper proposes a refined methodology and an example of the calculation of a fluidized bed granulator operating in the most energy-efficient technological mode.

Keywords: granulator, fluidized bed, specific surface area, surface shape and roughness.

Процессы гранулирования широко распространены в химической, нефтяной и газовой отраслях промышленности.

Многие гранулированные вещества являются основными компонентами буровых и тампонажных растворов. Так, например, использование гранулированного хлористого кальция сокращает время бурения и увеличивает сроки эксплуатации буров, существенно снижая капитальные и операционные затраты по эксплуатации месторождений нефти и газа [1].

Гранулирование в кипящем слое является одним из наиболее совершенных, с технологической точки зрения, способов проведения процесса. Основное его достоинство заключается в двойном механизме роста гранул:

1) возникновение центров гранулообразования и рост частиц за счёт наслаивания на их поверхность тонких плёнок;

2) агломерация мелких частиц при избытке жидкости на их поверхности с последующей кристаллизацией жидкой фазы. Кроме того, организация процесса гранулирования в кипящем слое позволяет одновременно проводить классификацию полученных гранул по размерам для поддержания требуемой дисперсности конечного продукта [2].

Однако существующие методики расчёта грануляторов кипящего слоя не учитывают истинной гидродинамической обстановки в аппарате, что приводит к отклонениям в определении значения рабочей порозности слоя. При этом совсем небольшая ошибка в расчёте порозности (не более 5 %) влечёт за собой весьма большую ошибку расчёта высоты кипящего слоя (до $\pm 30\%$). Данное обстоятельство приводит к лишнему расходу энергии либо на поддержание излишней рабочей высоты слоя, если отклонение положительное, либо, если отклонение отрицательное, на организацию рециркуляции конечного продукта для достижения требуемой его дисперсности, т. е. в любом случае снижает энергоэффективность процесса.

В связи с этим разработка методики расчёта грануляторов кипящего слоя, учитывающей реальную гидродинамическую обстановку в аппарате, является актуальной задачей.



Для решения поставленной задачи предлагается использовать следующие основные расчётные зависимости [3, 4].

Расход оживающего (сушильного) агента [3]:

$$L_w = \frac{G_k \cdot \omega_H}{X_k - X_H}, \tag{1}$$

где G_k – производительность по готовому продукту;
 ω_H – начальная влажность пульпы;
 X_k – влагосодержание воздуха при температуре на выходе из гранулятора;
 X_H – влагосодержание воздуха при температуре на входе в гранулятор.

Скорость начала псевдооживения, с учётом реальной гидродинамической обстановки в грануляторе, определяем по уравнению [4]:

$$Re_{KP} = \frac{Ar \cdot \varepsilon_0^{4,75}}{18 \cdot \varphi_{\Pi}^2 + \sqrt{\frac{\varphi_{\Pi} \cdot \varphi_{\Phi}}{3} \cdot Ar \cdot \varepsilon_0^{4,75}}}, \tag{2}$$

где Ar – число Архимеда;
 ε_0 – порозность слоя, соответствующая началу псевдооживения;
 φ_{Π} и φ_{Φ} – соответственно коэффициент удельной поверхности и коэффициент формы и шероховатости гранул готового продукта.

Рабочая скорость оживающего (сушильного) агента:

$$w = w_{KP} \cdot K, \tag{3}$$

где K – число псевдооживения.

Рабочая порозность кипящего слоя при учёте реальной гидродинамической обстановки в грануляторе [4]:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sqrt{\frac{\varphi_{\Pi} \cdot \varphi_{\Phi}}{12} \cdot Re} + \sqrt{\frac{\varphi_{\Pi} \cdot \varphi_{\Phi}}{12} \cdot Re^2 + 18 \cdot \varphi_{\Pi}^2 \cdot Re}}{\sqrt{Ar}} \right)^{0,42}. \tag{4}$$

Диаметр гранулятора [3]:

$$D_A = \sqrt{\frac{4 \cdot L_w}{\pi \cdot w}}. \tag{5}$$

Среднее время пребывания гранул в грануляторе определяем по уравнению [3]:

$$\frac{\omega_k}{\omega_H} = A \cdot Gu^B \cdot Fo^C, \tag{6}$$

где ω_k – конечная влажность готового продукта;
 Gu – число Гухмана;
 Fo – число Фурье;
 A, B и C – коэффициенты, зависящие от гранулируемого вещества.

Высота рабочей части гранулятора [3]:

$$H_p = 5,6 \cdot H_0 \cdot Re^{0,75} \cdot Ar^{-0,37}, \tag{7}$$

где H_0 – высота неподвижного слоя.

Основные результаты модельного расчёта гранулятора кипящего слоя производства аммофоса представлены в таблице.



Таблица – Основные результаты расчёта

Исходные данные			
1. Производительность по готовому продукту	кг/час	G_K	500
2. Начальная влажность пульпы	кг/кг	ω_H	0,3
3. Конечная влажность готового продукта	кг/кг	ω_K	0,005
4. Температура окружающего воздуха	°C	t_0	20
5. Температура воздуха на входе в гранулятор	°C	t_H	150
6. Температура воздуха на выходе из гранулятора	°C	t_K	75
7. Диаметр гранул готового продукта	мм	d	2
8. Коэффициент удельной поверхности гранул готового продукта	–	Φ_P	1,18
9. Коэффициент формы и шероховатости гранул готового продукта	–	Φ_Φ	1,27
10. Число псевдоожижения	–	K	2
11. Коэффициенты уравнения (6) для аммофоса	–	A	0,10
	–	B	–0,65
	–	C	–0,60
Расчётные параметры			
12. Производительность по пульпе	кг/час	G_H	710
13. Производительность по испарённой влаге	кг/час	W	210
14. Влагосодержание воздуха при температуре на входе в гранулятор	кг/кг	X_H	0,013
15. Влагосодержание воздуха при температуре на выходе из гранулятора	кг/кг	X_K	0,041
16. Тепловая нагрузка	кВт	Q	260
17. Расход оживающего (сушильного) агента	кг/час	L_W	5280
18. Порозность слоя, соответствующая началу псевдоожижения	m^3/m^3	ϵ_0	0,50
19. Число Архимеда	–	A_r	$2,5 \cdot 10^9$
20. Критическое число Рейнольдса для оживающего (сушильного) агента	–	$Re_{кр}$	100
21. Скорость начала псевдоожижения	м/с	$w_{кр}$	1,25
22. Рабочая скорость оживающего (сушильного) агента	м/с	w	2,50
23. Рабочее число Рейнольдса для оживающего (сушильного) агента	–	Re	200
24. Рабочая порозность кипящего слоя	m^3/m^3	ϵ	0,65
25. Диаметр гранулятора	м	D	0,87
26. Число Гухмана	–	Gu	0,11
27. Число Фурье	–	Fo	220
28. Среднее время пребывания гранул в грануляторе	с	T_C	2240
29. Масса псевдоожиженного слоя в грануляторе	кг	M	310
30. Высота неподвижного слоя в грануляторе	м	H_0	0,50
31. Высота рабочей части гранулятора	м	H_P	1,50
32. Высота сепарационной зоны гранулятора	м	H_C	0,17
33. Общая высота гранулятора	м	H	1,67
34. Гидравлическое сопротивление кипящего слоя	кПа	ΔP	5,2

Основные результаты расчёта в графическом виде представлены на рисунке.

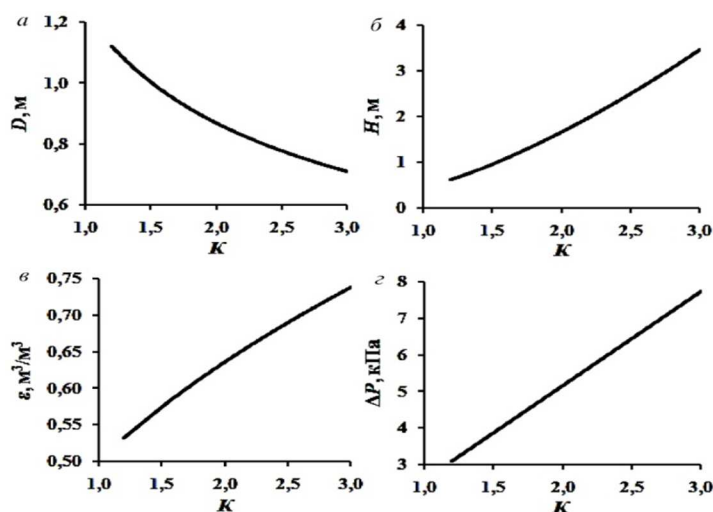


Рисунок – Зависимости от числа псевдоожижения: а – диаметра гранулятора $D = f(K)$; б – общей высоты гранулятора $H = f(K)$; в – рабочей порозности кипящего слоя $\epsilon = f(K)$; г – гидравлического сопротивления кипящего слоя $\Delta P = f(K)$



Анализируя полученные графические зависимости, можно рекомендовать рабочие значения числа псевдооживления в диапазоне $K = 2 \div 2,5$, что соответствует значению рабочей порозности кипящего слоя $\varepsilon = 0,64 \div 0,69$, необходимой и достаточной для обеспечения максимальной интенсивности теплообмена [4].

Таким образом, с помощью разработанной инженерной методики расчёта гранулятора кипящего слоя, учитывающей реальную гидродинамическую обстановку в аппарате, можно определить оптимальные габариты его конструкции в зависимости от технологических условий.

Литература:

1. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург : Летопись, 2005. – 664 с.
2. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. – М. : Химия, 1991. – 240 с.
3. Расчёт оборудования для гранулирования минеральных удобрений / М.Б. Генералов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1984. – 192 с.
4. Васильев П.С., Дрюков В.А., Рева Л.С. Энергоэффективная технология получения устойчивых водомазутных эмульсий // Булатовские чтения: материалы III Международной научно-практической конференции (31 марта 2019 г.): в 5 т. Т. 4. Химическая технология и экология в нефтяной и газовой промышленности / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2019. – С. 44–49.

References:

1. Ryazanov Y.A. Encyclopedia of drilling fluids. – Orenburg : Chronicle, 2005. – 664 p.
2. Klassen P.V., Grishaev I.G., Shomin I.P. Granulation. – M. : Chemistry, 1991. – 240 p.
3. Calculation of equipment for granulation of mineral fertilizers / M.B. Generalov [et al.]. – M. : Mashinostroenie, 1984. – 192 p.
4. Vasilyev P.S., Dryukov V.A., Reva L.S. Energy-efficient technology for producing stable water-oil emulsion // Readings of A.I. Bulatov: Materials of III International scientific and practical conference (On March 31, 2019): in 5 v. V. 4. Chemical technology and ecology in the oil and gas industry / Under the general editor, Doctor of Technical Sciences, Professor O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing House – South, 2019. – P. 44–49.