

УДК 666.762.11-492.3-127

# ВЫСОКОПОРИСТЫЙ ГРАНУЛИРОВАННЫЙ КОРУНДОВЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ ИЗ ГЛИНОЗЕМОПЕНОПОЛИСТИРОЛЬНЫХ МАСС. Часть 6. Оптимизация режима работы тарельчатого гранулятора\*<sup>1</sup>

Для сокращения количества опытов использовано математическое планирование эксперимента, позволяющее найти совокупность значений независимых переменных, определяющих область оптимальных выходных параметров: гранулометрического состава сырьевых гранул, предела прочности при сжатии в цилиндре, насыпной плотности материала после обжига.

**Ключевые слова:** корундовый наполнитель, параметры грануляции, тарель гранулятора, коэффициент загрузки, математическое планирование эксперимента, выходные характеристики.

**О**сновные показатели физико-технических свойств пористого корундового наполнителя значительно зависят от параметров грануляции глиноземополистирольных масс, к которым относятся продолжительность грануляции, диаметр, угол наклона, частота вращения и высота борта тарели гранулятора, а также степень ее загрузки. Регулируя эти параметры, можно направленно влиять на процесс грануляции и получить корундовый наполнитель с заданными свойствами.

Важным параметром работы тарельчатого гранулятора является коэффициент загрузки, определяющий количество материала, одновременно находящегося на тарели. На величину коэффициента загрузки, а следовательно, и на производительность грануляции заметно влияют высота борта, угол наклона и частота вращения тарели. С ростом двух последних показателей максимально допустимая величина коэффициента загрузки (при постоянной высоте борта тарели) уменьшается вследствие уве-

личения количества материала, удаляемого из гранулятора под действием центробежных сил. В результате предварительных исследований для применяемого в работе гранулятора был определен максимальный коэффициент загрузки тарели, равный 0,05, обеспечивающий нормальное протекание процесса грануляции всего загружаемого материала при наиболее жестком режиме работы гранулятора (угол наклона тарели 50°, частота вращения 24 об/мин).

Оптимизацию режима работы тарельчатого гранулятора осуществляли для стандартных условий: диаметр тарели гранулятора 1,0 м, высота борта тарели 0,19 м, коэффициент загрузки гранулятора 0,05. Изменение этих условий требует дополнительной корректировки остальных параметров грануляции. При оптимизации режима работы тарельчатого гранулятора первоочередной задачей являлось определение параметров грануляции, обеспечивающих получение наибольшего выхода наполнителя заданной крупности с максимально возможной прочностью при насыпной плотности не выше 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Для реализации поставленной задачи определяли влияние основных параметров работы тарельчатого гранулятора (продолжительность грануляции, частота вращения и угол наклона тарели) на основные выходные характеристики: гранулометрический состав сырьевых гранул, предел прочности при сжатии в цилиндре, насыпную плотность материала после обжига. Оптимальный режим работы гранулятора подбирали для формовочной массы оптимального

\*<sup>1</sup> Продолжение. Части 1 и 2 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 7 за 2017 г., часть 3 — в № 9 за 2017 г., часть 4 — в № 11 за 2017 г., часть 5 — в № 1 за 2018 г.



В. Н. Соков  
E-mail: sersok\_07@mail.ru

состава (состав 3), об. %: электрокорунд 24,5, технический глинозем 10,5, пенополистирол 65,0 (с формовочной влажностью 16,0 %).

Для сокращения числа опытов и увеличения количества и достоверности необходимой информации было использовано математическое планирование эксперимента (план Хартли). Диапазон варьирования входных (независимых) переменных параметров грануляции устанавливали с учетом основных конструктивных характеристик существующего оборудования и на основании априорных данных. Такая постановка вопроса предопределяет возможность использования стандартного оборудования. Границы изменения параметров грануляции приведены в табл. 1. Опыты для определения оптимальных параметров работы гранулятора проводили в соответствии с принятым планом Хартли (табл. 2). Усредненные величины выходных характеристик, полученные в результате эксперимента, приведены в табл. 3.

Математическое описание исследуемого процесса представляется в виде некоторого полинома — отрезка ряда Тейлора, который разлагается в виде зависимости

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3, \quad (1)$$

где  $Y$  — выходная характеристика;  $\beta_{ij}$  — коэффициенты полинома;  $X_1 - X_3$  — указаны в табл. 2.

Влияние параметров грануляции на выходные характеристики с достаточной точностью описывается с помощью математических моделей, рассчитанных на основании результатов

эксперимента. Модели в стандартизированном масштабе имеют следующий вид:

$$Y_1 = 85 - 9X_1 + 17X_2 + 16,5X_3 + 5X_1X_3 - 11,5X_2X_3 - 14X_1^2 - 11,5X_3^2, \quad (2)$$

$$Y_2 = 5,1 + 0,4X_1 + 0,52X_2 + 0,8X_3 - 0,3X_1X_2 + 0,77X_1X_3 - 0,3X_3^2, \quad (3)$$

$$Y_3 = 1010 + 30X_1 + 43X_2 + 60X_3 - 26,1X_1X_2 + 44X_1X_3 - 25X_3^2, \quad (4)$$

где  $Y_1 - Y_3$  — указаны в табл. 3.

Результаты расчета основных статистических характеристик приведены в табл. 4. Результаты изучения математических моделей и анализ коэффициентов полиномов позволили определить воздействие и величину вклада каждого параметра грануляции на выходные характеристики готового продукта. Наиболее важное влияние на свойства корундового заполнителя оказывает фактор продолжительности грануляции. Абсолютная величина коэффициентов для этого фактора принимает во всех уравнениях наибольшие значения как при линейных и квадратичных членах, так и для парных сочетаний с другими факторами. Исключение составляют уравнения для описания предела прочности при сжатии в цилиндре и насыпной плотности, в которых коэффициенты при парном сочетании со вторым фактором (частотой вращения тарели) статистически незначимы.

Влияние продолжительности грануляции на конечные свойства корундовых гранул изучали при угле наклона тарели гранулятора 45° и частоте ее вращения 24 об/мин. Результаты исследований, приведенные в табл. 5 и пока-

Таблица 1. Уровни варьирования параметров грануляции

Уровень варьирования факторов	Стандартизированный масштаб входных переменных (факторов)			Фактический масштаб входных переменных (факторов)		
	продолжительность грануляции	угол наклона тарели	частота вращения тарели	продолжительность грануляции, мин	угол наклона тарели, град	частота вращения тарели, об/мин
Верхний	0,58	0,58	0,58	10	48	24
Нижний	-0,58	-0,58	-0,58	5	42	12
Шаг варьирования	0,58	0,58	0,58	2,5	3,0	6
Базовый	0	0	0	7,5	45	18
Плечо:						
минимальное	-1	-1	-	3	40	-
максимальное	1	1	-	12	50	-

Таблица 2. Матрица плана Хартли

Номер опыта	Значения переменных в физическом масштабе		
	$X_1$ — угол наклона тарели, град	$X_2$ — частота вращения тарели, об/мин	$X_3$ — продолжительность грануляции, мин
1	48	24	10
2	42	12	10
3	48	24	5
4	42	18	5
5	45	18	7,5
6	50	18	7,5
7	40	18	7,5
8	45	18	12
9	45	18	3

Таблица 3. Данные выходных характеристик

Номер опыта	$Y_1$ — суммарный выход фракций 5–10 и 10–20 мм, %	$Y_2$ — предел прочности при сжатии в цилиндре, МПа	$Y_3$ — насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	90	5,9	1065
2	85	4,6	970
3	45	4,3	950
4	86	5,0	1000
5	88	5,2	1015
6	62	5,6	1045
7	80	4,8	985
8	90	5,6	1045
9	57	4,0	925

Таблица 4. Основные статистические выходные характеристики

Показатели	Суммарный выход фракций 5–10 и 10–20 мм	Предел прочности при сжатии в цилиндре	Насыпная плотность
Средняя дисперсия единичного опыта	5,1	1,07	128
Критерий Кохрена:			
табличный	0,4775	0,4775	0,4775
расчетный	0,261	0,377	0,260
Критерий Фишера:			
табличный	5,978	4,559	4,559
расчетный	2,53	4,42	2,06

Таблица 5. Влияние продолжительности грануляции формовочной массы состава 3 на фракционный состав и свойства корундовых гранул

Продолжительность грануляции, мин	Содержание, %, фракции, мм				Предел прочности при сжатии, МПа	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение, мас. %
	<5	5–10	10–20	20–40			
3	40,5	39,0	18,0	2,5	4,0	925	15,7
5	18,0	52,0	24,0	6,0	4,6	970	13,9
7,5	7,0	57,0	31,0	5,0	5,2	1015	13,5
10	3,5	58,0	31,0	7,5	5,5	1035	13,2
12	1,0	60,0	30,0	9,0	5,6	1045	13,8

занные на рис. 1, хорошо согласуются с расчетными данными (рис. 2–4) и позволяют сделать следующий вывод: увеличение продолжитель-

ности грануляции при прочих равных условиях способствует укрупнению получаемых гранул, росту их плотности и прочности, снижению водопоглощения. Однако уплотнение структуры гранул за счет сближения частиц гранулируемого материала возможно лишь до тех пор, пока избыток воды на их поверхности поглощается в результате присоединения новых частиц материала. Следует отметить, что для данного режима работы тарельчатого гранулятора, характеризующего величину динамических нагрузок на материал, имеется определенная степень уплотнения гранул, по достижении которой дальнейшее выделение воды на их поверхности прекращается. Гранулы перестают расти, а их прочность достигает максимальной величины.

Влияние фактора частоты вращения тарели гранулятора несколько слабее, чем фактора времени, хотя в уравнении для описания суммарного выхода крупных фракций величина коэффициентов при линейном члене и парном сочетании значительна. Анализ полиномов показал, что с увеличением частоты вращения тарели возрастают все выходные характеристики исследуемого материала (выход фракций 5–10 и 10–20 мм, прочность, средняя плотность, см. рис. 2–4), на что указывают положительные знаки коэффициентов для данного фактора. Прямая зависимость свойств гранулята от частоты вращения тарели объясняется увеличением продолжительности рабочей фазы окомкования, т. е. того периода времени, когда гранулируемый материал скатывается по поверхности тарели. Эти закономерности полностью подтверждаются эмпирическими данными, полученными при грануляции масс оптимального состава при различных частоте и угле наклона тарели гранулятора (рис. 5, 6, табл. 6). Кроме того, как видно из табл. 6, увеличение частоты

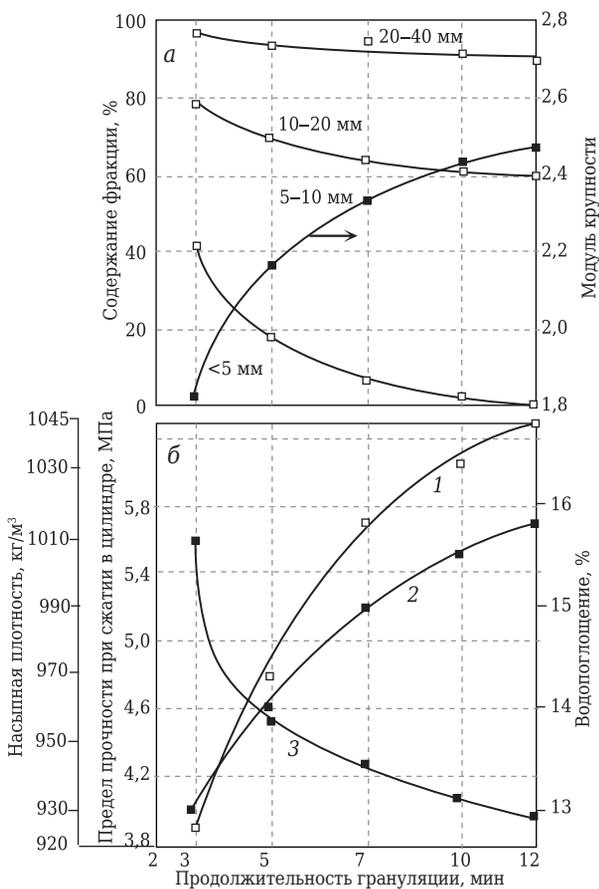
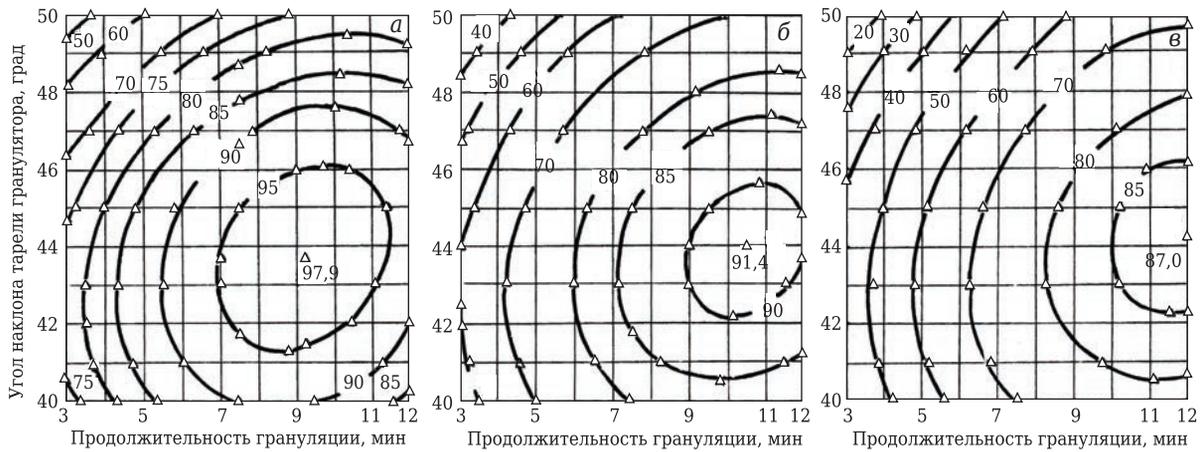
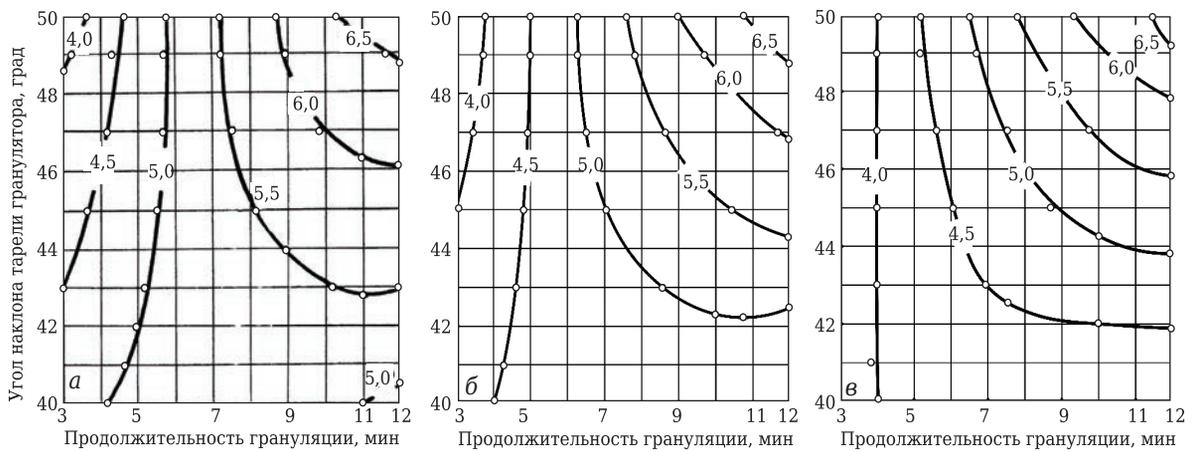


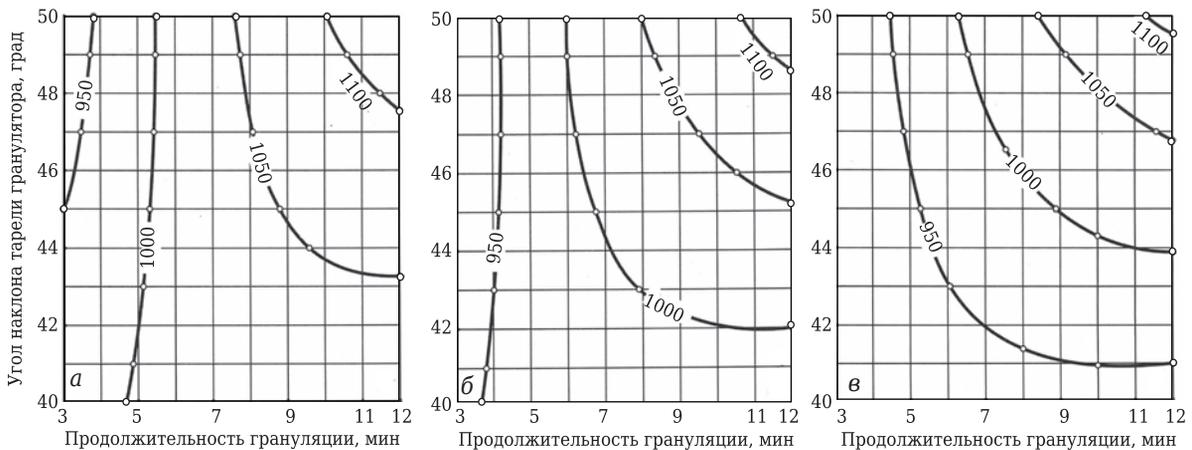
Рис. 1. Влияние продолжительности грануляции на выход фракций и модуль крупности сырцовых гранул (а), а также на насыпную плотность (1), предел прочности при сжатии (2) и водопоглощение (3) обожженных гранул (б). Угол наклона тарели 45°, частота вращения тарели 24 об/мин



**Рис. 2.** Диаграммы зависимости гранулометрического состава корундовых гранул от параметров грануляции. Частота вращения тарелки: 24 (а), 18 (б) и 12 об/мин (в). Цифры на кривых — суммарный выход фракций 5–10 и 10–20 мм, %



**Рис. 3.** Диаграммы зависимости прочностных характеристик корундовых гранул от параметров грануляции. Частота вращения тарелки 24 (а), 18 (б) и 12 об/мин (в). Цифры на кривых — предел прочности при сжатии гранул в цилиндре, МПа

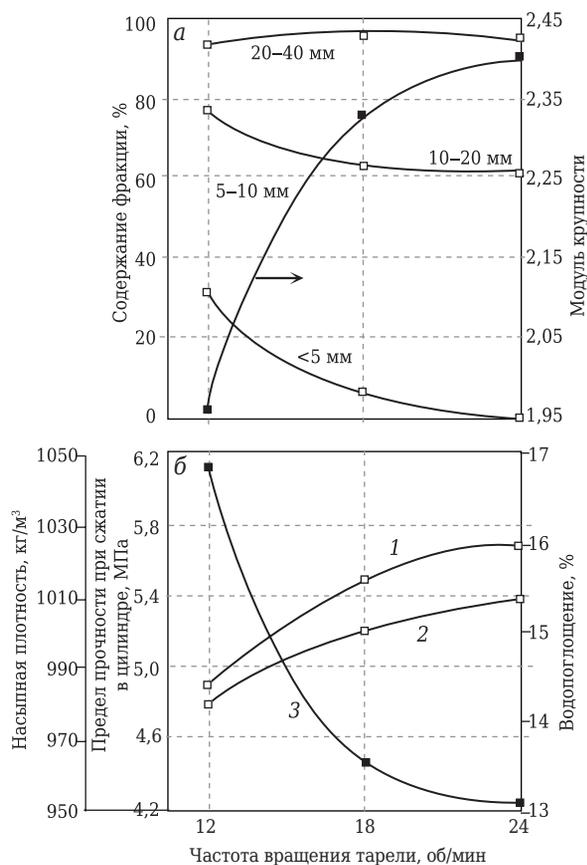


**Рис. 4.** Диаграммы зависимости насыпной плотности корундовых гранул от параметров грануляции. Частота вращения тарелки 24 (а), 18 (б) и 12 об/мин (в). Цифры на кривых — насыпная плотность гранул, кг/м<sup>3</sup>

вращения тарелки способствует уменьшению водопоглощения заполнителя.

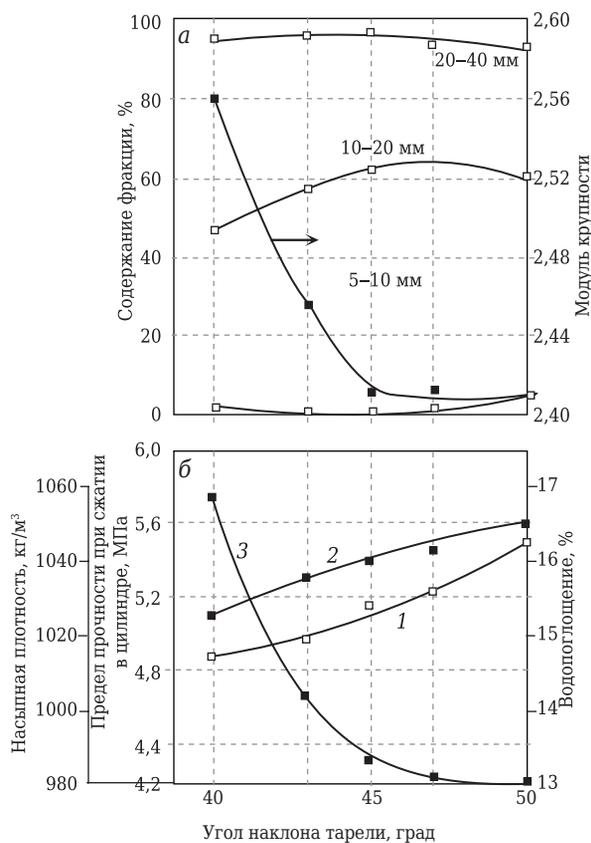
Изменение угла наклона тарелки гранулятора является одним из эффективных способов регулирования фракционного состава заполни-

теля, как видно из табл. 6 и рис. 6. Увеличение угла наклона тарелки способствует уменьшению размера получаемых гранул, что связано с одновременным ростом конечной скорости их скатывания и силы удара о борт гранулятора или



**Рис. 5.** Влияние частоты вращения тарели на выход фракций и модуль крупности сырцовых гранул (а), а также на насыпную плотность (1), предел прочности при сжатии (2) и водопоглощение (3) обожженных гранул (б). Угол наклона тарели 45°, продолжительность грануляции 7,5 мин

массу уже скатившихся гранул. Причем чем больше размер гранул, тем выше вероятность, что в момент удара напряжения в них не превысят допустимые и они разрушатся. Значимость фактора угла наклона тарели гранулятора для гранулометрии получаемого заполнителя достаточно хорошо подтверждается величиной и знаком коэффициентов как при линейном, так и при квадратичном членах в уравнении (2). Для каждого угла наклона тарели существует



**Рис. 6.** Влияние угла наклона тарели на выход фракций и модуль крупности сырцовых гранул (а), насыпную плотность (1), предел прочности при сжатии (2) и водопоглощение (3) обожженных гранул (б). Частота вращения тарели 24 об/мин, длительность грануляции 7,5 мин

оптимальная частота вращения, обеспечивающая возможность получения наиболее однородного состава гранул с высокими показателями свойств (см. рис. 2–4).

Анализ полиномов показал, что средняя плотность и прочность получаемых гранул в зависимости от продолжительности грануляции и частоты вращения тарели с увеличением ее угла наклона может как уменьшаться, так и возрастать. Рост угла наклона тарели приводит к тому,

**Таблица 6. Влияние частоты вращения и угла наклона тарели гранулятора\* на фракционный состав и свойства корундовых гранул из формовочной массы состава 3**

Угол наклона тарели, град	Частота вращения тарели, об/мин	Содержание, %, фракции, мм				Предел прочности при сжатии в цилиндре, МПа	Насыпная плотность, кг/м³	Водопоглощение, мас. %
		<5	5-10	10-20	20-40			
40	12	14,0	50,0	28,0	8,0	4,3	950	17,6
45	12	32,0	46,0	16,0	6,0	4,8	985	16,9
50	12	51,0	38,0	10,0	1,0	5,1	1015	15,2
40	18	10,0	39,0	41,0	10,0	4,8	985	16,5
45	18	7,0	57,0	31,0	5,0	5,2	1015	13,5
50	18	38,0	38,0	23,5	0,5	5,6	1045	13,1
40	24	2,0	45,0	48,0	5,0	5,1	1015	16,1
45	24	1,0	61,0	34,0	4,0	5,4	1025	13,3
50	24	5,0	56,0	32,0	7,0	5,6	1045	13,0

\* Продолжительность грануляции 7,5 мин.

что за небольшой промежуток времени гранулируемый материал не успевает уплотниться вследствие высоких динамических нагрузок, отрицательно действующих (разрыхление структуры) на еще не сформировавшийся гранулят. Увеличение продолжительности грануляции до некоторого момента обеспечит интенсивный массообмен, рост и формирование достаточно прочной структуры гранул. Дальнейшее воздействие высоких динамических нагрузок будет уже способствовать уплотнению и упрочнению структуры сырца. Чем меньше частота вращения тарели, тем меньше динамические нагрузки на гранулируемый материал, тем быстрее достигается промежуток времени, начиная с которого рост угла наклона тарели будет увеличивать прочность и плотность получаемых гранул (см. рис. 2–4). Полученные закономерности хорошо согласуются с опытными данными (см. табл. 5, 6, рис. 1, 5, 6). Применение математического планирования эксперимента позволяет не только получить математическое описание исследуемого процесса, но и найти совокупность значений независимых переменных, определяющих область оптимальных выходных характеристик.

Оптимизацию режима работы тарельчатого гранулятора осуществляли путем решения систем уравнений, полученных в результате приравнивания к нулю первых производных по всем независимым переменным для функций, описывающих выходные характеристики готового продукта. Однако ввиду того, что области оптимальных значений исследуемых функций не совпали, поставленную задачу решали графически (рис. 7) путем определения области с наибольшим выходом заполнителя фракций 5–10 и 10–20 мм и максимально возможной прочностью при насыпной плотности в пределах 1000 кг/м<sup>3</sup>. Анализ полученных данных позволил принять для дальнейших исследований в качестве оптимального следующий режим работы гранулятора: продолжительность грануляции 7,5–8,0 мин, угол наклона тарели 45°, частота вращения та-

рели 24 об/мин. Полученный при этом режиме грануляции пористый корундовый заполнитель имел следующие показатели с учетом 95 %-ного доверительного интервала: суммарный выход фракций 5–10 и 10–20 мм 95–97 %, насыпная плотность 1000–1050 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии в цилиндре 5,5–6,0 МПа. Результаты определения оптимального режима грануляции формовочных масс для получения заполнителя насыпной плотностью 600 (состав 1) и 800 кг/м<sup>3</sup> (состав 2) приведены в табл. 7 и 8\*2.

Для процесса грануляции масс с более высоким содержанием выгорающей добавки характерны те же закономерности, что и для масс, используемых при получении заполнителя на-

\*2 Состав 1 формовочной смеси, об. %: электрокорунд 14,7, технический глинозем 6,3, пенополистирол 79,0; состав 2 — соответственно 19,6, 8,4 и 72 % (см. журнал «Новые огнеупоры» № 1 за 2018 г., табл. 1 на с. 57).

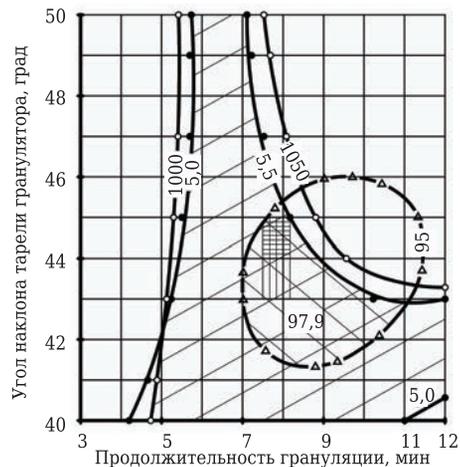


Рис. 7. Диаграмма определения области оптимальных значений параметров для заполнителя состава 3. Цифры на кривых: Δ — суммарный выход фракций 5–10 и 10–20 мм, %; ● — предел прочности при сжатии в цилиндре, МПа; ○ — насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>. Частота вращения тарели 24 об/мин

Таблица 7. Влияние продолжительности грануляции\* формовочной массы составов 1 и 2 на фракционный состав и свойства корундовых гранул

Продолжительность грануляции, мин	Содержание, %, фракции, мм				Предел прочности при сжатии в цилиндре, МПа	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
	<5	5–10	10–20	20–40		
<i>Состав 1</i>						
3	35,0	51,0	14,0	–	1,2	570
5	28,0	52,0	19,0	1,0	1,4	595
7	14,5	57,5	25,5	2,5	1,5	615
10	11,0	60,0	27,0	2,0	1,6	630
12	7,5	56,0	30,0	5,5	1,9	640
<i>Состав 2</i>						
3	39,5	47,0	12,5	1,0	2,0	745
5	21,5	52,0	25,0	1,5	2,4	785
7	12,0	60,0	26,5	1,5	2,8	810
10	6,0	61,0	30,5	2,5	3,1	840
12	2,0	58,0	36,0	4,0	3,3	860

\* Угол наклона тарели 45°, частота вращения тарели 18 об/мин.

Таблица 8. Влияние угла наклона и частоты вращения тарели гранулятора\* на фракционный состав и свойства корундовых гранул из формовочной массы составов 1 и 2

Угол наклона тарели, град	Частота вращения тарели, об/мин	Содержание, %, фракции, мм				Предел прочности при сжатии в цилиндре, МПа	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
		<5	5–10	10–20	20–40		
<i>Состав 1</i>							
40	12	26,0	46,0	25,0	3,0	0,9	535
45	12	40,0	42,0	17,0	1,0	1,1	565
50	12	37,0	49,0	14,0	–	1,4	605
40	18	10,0	52,0	34,5	3,5	1,2	590
45	18	14,5	57,5	25,5	2,5	1,5	615
50	18	25,0	62,0	12,0	1,0	1,6	630
40	24	1,0	56,0	41,5	2,5	1,3	605
45	24	0,3	66,5	30,5	2,7	1,7	625
50	24	2,5	61,0	36,0	0,5	1,9	640
<i>Состав 2</i>							
40	12	18,0	53,0	24,0	5,0	2,0	740
45	12	36,0	46,0	16,5	1,5	2,3	760
50	12	43,0	43,5	12,5	1,0	2,6	795
40	18	6,0	54,0	34,0	6,0	2,5	780
45	18	12,0	60,5	26,5	1,5	2,8	810
50	18	14,0	65,0	20,0	1,0	3,0	825
40	24	1,0	50,0	43,0	6,0	2,6	810
45	24	4,0	66,0	29,0	1,0	3,1	830
50	24	1,5	63,0	35,0	0,5	3,3	840

\* Продолжительность грануляции 7,0 мин.

сыпной плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup>. Однако массы с высоким содержанием пенополистирола гранулируются несколько хуже и требуют для получения достаточно плотного сырца более высоких динамических нагрузок. Анализ результатов исследований выявил необходимость для получения заполнителя насыпной плотностью 600 и 800 кг/м<sup>3</sup> принять в дальнейших исследованиях следующий режим работы гранулятора: продолжительность грануляции 7,5–8,0 мин, угол наклона тарели 50°, частота вращения тарели 24 об/мин. При этом корундовые гранулы имели следующие показатели: насыпная плотность 600–650 и 800–850 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии в цилиндре 1,7–2,0 и 3,1–3,4 МПа, суммарный выход фракций 5–10 и 10–20 мм 95–98 и 95–98 %.

При переходе от одного размера тарели гранулятора к другому необходимым условием, обеспечивающим получение заполнителя с аналогичными

свойствами, является сохранение абсолютной величины динамических уплотняющих нагрузок. Если для гранулятора диаметром  $D_1$  опытным путем найдены оптимальные значения угла  $\alpha_1$  и частоты  $n_1$  вращения тарели, обеспечивающие получение максимальной производительности по гранулам заданного размера с определенными показателями физико-технических свойств, то оптимальный режим  $\alpha_2$  и  $n_2$  работы гранулятора диаметром  $D_2$  может быть найден из следующих соотношений:

$$\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2 = \frac{D_1}{D_2} (\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1), \quad (5)$$

$$n_1 D_1 = n_2 D_2 = \text{const}, \quad (6)$$

где  $f$  — коэффициент трения материала о поверхность днища тарели. ■

Получено 02.03.17  
© В. Н. Соков, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

2-я Глобальная конференция и выставка Cemprocess  
Оптимизация в цементной промышленности

**global** PROCESS OPTIMISATION  
IN CEMENT MANUFACTURE  
**cemprocess**  
CONFERENCE & EXHIBITION

23–24 мая 2018 г.

Лондон, Великобритания



[www.globalcement.com](http://www.globalcement.com)