

## ЗАВИСИМОСТЬ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОРОШКА ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА ОТ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ С РЕЖУЩИМИ КРОМКАМИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Нефедов Я.А.<sup>1</sup>, Черных А.А.<sup>1</sup>, Караваев Д.М.<sup>1</sup>, Матыгуллина Е.В.<sup>1</sup>, Макарова Л.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, kmcm@ya.ru

Измельчение элементами с режущими кромками проводили циклами. Включали измельчитель на время  $t_c$ , затем останавливали и снова запускали. Исследования проведены в соответствии с методикой планирования экспериментов, в рамках полного факторного эксперимента 2<sup>2</sup>. Для исследования выбраны два фактора: скорость вращения элементов измельчителя с режущими кромками и время цикла. Получено регрессионное уравнение. Установлено, что при скорости вращения 1400 об/мин по сравнению со скоростью 700 об/мин насыпная плотность увеличивается при одном и том же времени измельчения в ~ 1.5 раза. Показано, что при одной и той же скорости вращения элементов измельчителя с режущими кромками продолжительность цикла измельчения не критична. При увеличении скорости вращения элементов измельчителя с режущими кромками в 2 раза измельчение до заданной насыпной плотности производится в 2 раза быстрее. Измельчитель и устройство для определения насыпной плотности пористых материалов запатентованы.

Ключевые слова: терморасширенный графит, насыпная плотность, измельчитель, элементы измельчителя с режущими кромками, планирование эксперимента, регрессионное уравнение.

## DEPENDENCE OF BULK DENSITY OF POWDER EXPANDED GRAPHITE ON THE ROTATIONAL SPEED OF GRINDING ELEMENTS WITH CUTTING EDGE AND GRINDING TIME CYCLE

Nefedov Y.A.<sup>1</sup>, Chernykh A.A.<sup>1</sup>, Karavaev D.M.<sup>1</sup>, Matygullina E.V.<sup>1</sup>, Makarova L.E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, 614990, Komsomolsky Av. 29, kmcm@ya.ru

Grinding elements with cutting edges was performed in cycles. Starts the grinder at the time  $t_c$ , then stop and restart. Investigations conducted in accordance with the methodology of design of experiments, in the context of a full factorial experiment 2<sup>2</sup>. Two factors are selected for studies: the rotational speed of grinding elements with cutting edges and cycle time. The regression equation are obtained. It is found that when the rotational speed 1400 min<sup>-1</sup> compared with a speed of 700 min<sup>-1</sup> increases the bulk density at the same time grinding in a ~ 1.5. It is shown that at the same speed grinding elements with cutting edge grinding time cycle is not critical. With increasing speed grinding elements with cutting edge grinding two times grinding to a predetermined bulk density is produced 2 times faster. Grinder and device to determine bulk density of porous materials have been patented.

Keywords: expanded graphite, bulk density, grinder, grinding elements with cutting edge, experiment planning, regression equation.

Величина насыпной плотности порошка зависит от объемной массы (плотности) материала исследуемого порошка, размера и формы его частиц, плотности укладки частиц и состояния их поверхности [8]. Насыпная плотность является одним из важнейших технологических свойств порошковых материалов, от которого зависит выбор высоты матрицы пресс-формы и режим прессования [4].

Терморасширенный графит-пух (ТРГ-пух), использующийся в качестве исходного материала при производстве термостойких до 550°C композиционных материалов [3, 4], занимает значительный объем в пространстве, легок, воздушен, так как это высокопористая система со сложной организацией структуры [9, 10]. ТРГ-пух имеет насыпную плотность 1-4

кг/м<sup>3</sup> и удельную поверхность 30-80 г/м<sup>2</sup> в зависимости от морфологических особенностей исходного графита[1].

Ранее в работе [4] было установлено, что измельчение ТРГ-пуха необходимо проводить в две стадии. На I стадии измельчения при использовании измельчителя с гладкой поверхностью длина червеобразных частиц ТРГ уменьшается за счет их излома в перенапряженных, дефектных местах. На II стадии измельчение проводится инструментом с режущими кромками.

Целью данной работы является экспериментальное установление зависимости насыпной плотности порошка терморасширенного графита от продолжительности цикла измельчения  $t_{ци}$  скорости вращения  $n$  элементов измельчителя с режущими кромками (II стадия).

### Материалы и методы исследования

Для этого измельчение исходного ТРГ-пуха с насыпной плотностью  $4.0 \pm 0.2 \text{ кг/м}^3$  проводили в две стадии в устройстве – измельчителе, имеющем две камеры измельчения (рис.1). Измельчение проводили циклами. В конце каждого цикла измеряли насыпную плотность порошка ТРГ. В работе [5], патенте [6] подробно описаны устройство измельчителя и способ измельчения.

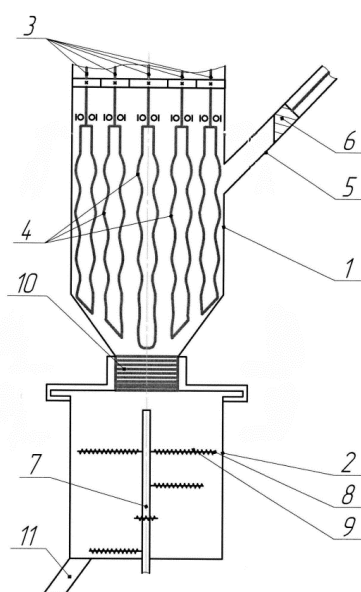


Рис.1. Измельчитель: 1 – загрузочный бункер; 2 – цилиндрическая камера размола; 3 – ротор; 4 – элементы измельчителя с гладкой поверхностью; 5 – загрузитель; 6 – поршень; 7 – ротор; 8 – элементы измельчителя с режущими кромками; 9 – рельеф в виде плотноразмещенных пирамид; 10 – эластичный патрубков; 11 – отводной патрубков

Насыпную плотность определяли на специальном устройстве, показанном на рис. 2 а, б. Устройство для определения насыпной плотности пористых материалов и способ измерения подробно описаны в работе [5] и патенте [7].

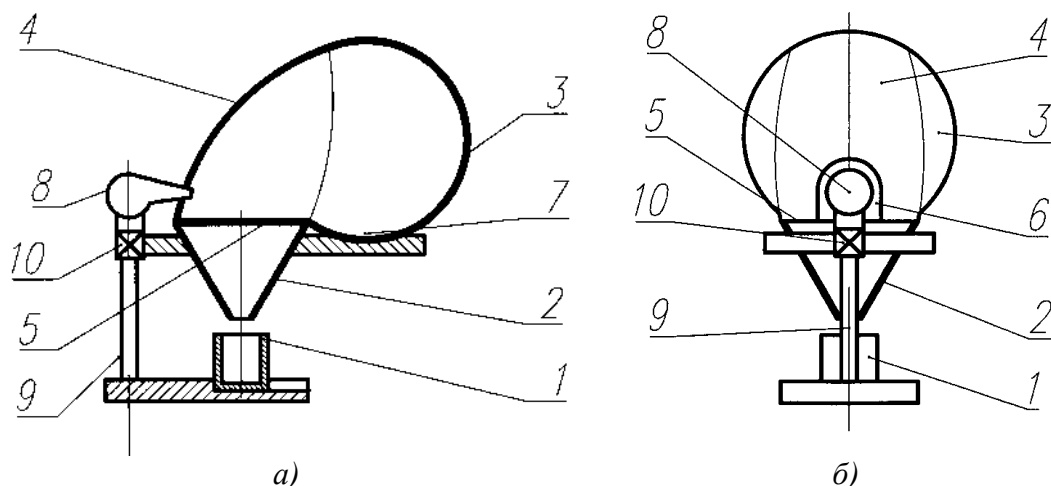


Рис. 2. Устройство для определения насыпной плотности пористых материалов (а – главный вид, б – вид сбоку): 1 – мерный цилиндр; 2 – стеклянная воронка; 3 – часть емкости шарообразной формы; 4 – часть емкости в виде куполообразного козырька; 5 – открытое круглое основание козырька; 6 – сквозное отверстие; 7 – приемник; 8 – сопло; 9 – штатив; 10 – шарнирный или гибкий элемент

Исследования проводили в соответствии с методикой планирования экспериментов. Каждую из серий испытаний выполняли в рамках полного факторного эксперимента. Факторы – скорость вращения элементов измельчителя с режущими кромками(n) и время цикла ( $t_{ц}$ ) – задавали на двух уровнях (минимальном и максимальном). Каждый эксперимент при выбранной комбинации параметров n и  $t_{ц}$  повторяли по 3 раза. Опыты рандомизировали во времени, чтобы исключить влияние случайных ошибок, вызванных внешними условиями.

Для построения зависимости насыпной плотности от параметров измельчения n и  $t_{ц}$  использовали математическую модель первого порядка в виде полинома [3].

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

В этом случае факторы кодируются по формуле

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (2)$$

где  $X_i$  – кодовое значение i-го фактора;  $x_i$  – натуральное текущее значение i-го фактора;  $x_{i0}$  – начальный (нулевой) уровень фактора;  $\Delta x_i$  – интервал варьирования i-го фактора:

$$\Delta x_i = \frac{x_{imax} - x_{imin}}{2} \quad (3)$$

Значения выбранных уровней варьируемых факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов				
№ п/п	Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	n, мин <sup>-1</sup>	$t_{ц}$ , с
			X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1.	Основной	0	1050	10

2.	Интервал варьирования	$\Delta x$	350	5
3.	Нижний	-1	700	5
4.	Верхний	+1	1400	15

Матрица планирования для экспериментального плана  $2^2$  представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	$y_{u1}$	$y_{u2}$	$y_{u3}$	$\bar{y}_u$
1	+1	-1	-1	+1	$y_{11}$	$y_{21}$	$y_{31}$	$\bar{y}_1$
2	+1	+1	-1	-1	$y_{12}$	$y_{22}$	$y_{32}$	$\bar{y}_2$
3	+1	-1	+1	-1	$y_{13}$	$y_{23}$	$y_{33}$	$\bar{y}_3$
4	+1	+1	+1	+1	$y_{14}$	$y_{24}$	$y_{34}$	$\bar{y}_4$

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис.3 представлены сравнительные данные зависимости насыпной плотности от времени измельчения, полученные в результате предварительного измельчения в камере 1 ТРГ до насыпной плотности частиц  $14 \pm 1$  кг/м<sup>3</sup> гладкими поверхностями элементов измельчителя при скорости их вращения  $800 \text{ мин}^{-1}$ , а затем в камере размола 2 измельчителя (рис. 1), используя элементы режущими кромками.

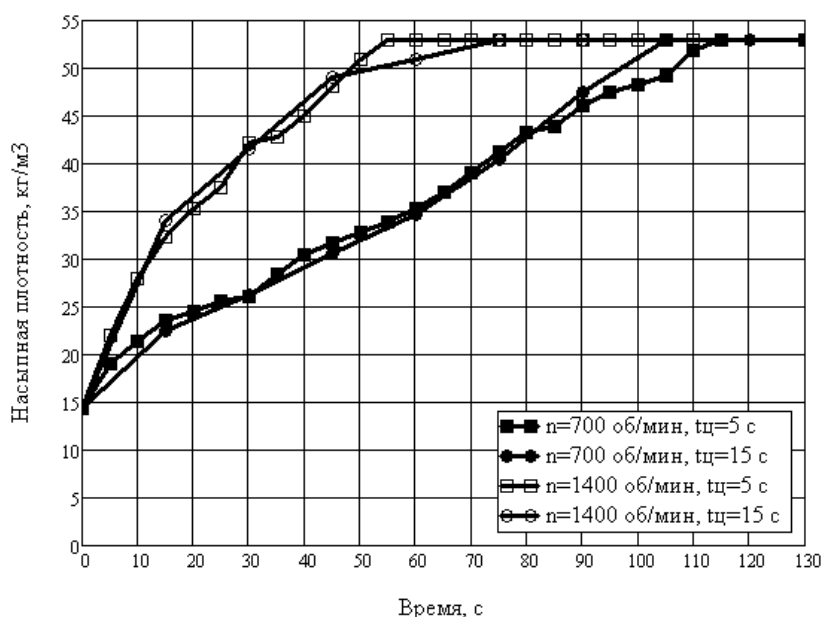


Рис.3. Изменение насыпной плотности ТРГ в процессе измельчения элементами с режущими кромками (II стадия)

Из рис. 3 видно, что насыпная плотность ТРГ с увеличением времени измельчения увеличивается до  $53 \pm 2$  кг/м<sup>3</sup>, дальнейшее увеличение времени измельчения не влияет на величину насыпной плотности ТРГ, т.к. порошок ТРГ в камере размола находится ниже уровня элементов с режущими кромками (ножей). При скорости вращения  $1400 \text{ мин}^{-1}$  по сравнению со скоростью  $700 \text{ мин}^{-1}$  насыпная плотность увеличивается при одном и том же времени измельчения в  $\sim 1.5$  раза. Очевидно, что при одной и той же скорости вращения

элементов измельчителя с режущими кромками продолжительность цикла измельчения не критична. При увеличении скорости вращения элементов измельчителя с режущими кромками в 2 раза измельчение до заданной насыпной плотности производится в 2 раза быстрее.

Значения насыпной плотности ТРГ, измельченного за 60 сек. элементами с режущими кромками, сведены в табл. 3. Сравнение данных измельчения проведено при времени 60 сек. в связи с тем, что при большем времени измельчения и скорости вращения элементов измельчителя с режущими кромками  $1400 \text{ мин}^{-1}$  уровень измельчаемого порошка становится ниже уровня элементов измельчителя.

При повторном измельчении элементами измельчителя с режущими кромками получен порошок ТРГ с насыпной плотностью  $200 \pm 10 \text{ кг/м}^3$ .

**Таблица 3**

Результаты определения насыпной плотности ТРГ, измельченного (за 60 с) элементами с режущими кромками

№ опыта	$Y_{u1}$	$Y_{u2}$	$Y_{u3}$	$\bar{Y}_u$	$S^2$	$S_n$	$W_n, \%$	$S_{n\bar{y}}$	$\Delta y (\alpha=0.95)$	$\hat{y}_u$
1	40,9	32,5	31,5	35,0	26,7	5,2	14,8	3,0	12,8	34,7
2	52,9	52,9	52,9	52,9	0	0	0	0	0	51,5
3	32,5	39,1	32,5	34,7	14,5	3,8	11,0	2,2	9,5	34,7
4	49,9	49,9	52,9	50,9	3,0	1,7	3,4	1,0	4,3	51,5
5*	42,8	39,1	47,2	43,0	16,4	4,1	9,4	2,3	10,1	43,1

В табл. 3 кроме результатов экспериментов представлены результаты их статистической обработки, а именно, средние значения насыпной плотности –  $\bar{Y}_u$ , дисперсия параллельных опытов –  $S^2$ , средняя квадратичная ошибка одиночного результата при  $n$  измерениях –  $S_n$ , коэффициент вариации –  $W_n$ , средняя квадратичная ошибка среднего арифметического –  $S_{n\bar{y}}$ , доверительный интервал среднего арифметического –  $\Delta y$ , расчетные значения насыпной плотности –  $\hat{y}_u$ , найденные по уравнению регрессии.

Статистическая обработка значений, полученной насыпной плотности показала, что дисперсия параллельных опытов не превышала  $S^2 \leq 26,7$ . Для определения возможности регрессионного анализа рассчитали однородность дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена [3]. Так как расчетное значение критерия Кохрена  $Gr=0.634$  меньше табличного  $G_{табл}=0.7679$  [2] при уровне значимости  $\alpha=0.05$ , то гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается, и, значит, возможно проведение регрессионного анализа.

Рассчитав коэффициенты уравнения (1), получили уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 43.4 + 8.5X_1 - 0.6X_2 - 0.4X_1X_2 \quad (6)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов проводили с помощью t-критерия Стьюдента. Все коэффициенты уравнения (6), кроме  $b_1$  и  $b_{12}$ , статистически значимы при уровне значимости 0,05 и имеют доверительный интервал  $\pm 2.2$ .

Дополнительно провели опыт на основном уровне варьирования факторов, то есть при  $n=1050 \text{ мин}^{-1}$  и  $t_d=10 \text{ с}$ , который повторили 3 раза. Результаты опыта внесли в табл.3 в строку 5\*. Так как расчетный критерий Фишера  $F_p=0.592$  меньше 1, то уравнение (6) адекватно [3].

Для приведения уравнения (6) к виду с натуральными значениями факторов использовали формулу кодирования (2), подставляя в уравнение (6) вместо кодовых натуральные значения факторов [3].

$$\hat{y} = 17.9 + 0.024x_1 \quad (7)$$

Из уравнения следует, что при одинаковом времени измельчения ТРГ насыпная плотность увеличивается с увеличением скорости вращения измельчающих элементов с режущими кромками.

Заключение: исследованы основные факторы, влияющие на насыпную плотность ТРГ при измельчении элементами с гладкой поверхностью и с режущими кромками. Приведены аналитические зависимости насыпной плотности терморасширенного графита от скорости вращения элементов измельчителя и продолжительности цикла измельчения.

### Список литературы

1. Белова М.Ю. От черного мела к уплотнениям из ТРГ / М.Ю. Белова // Арматуростроение. 2008. № 1 (52). С. 36-43.
2. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М.: Наука. Главная редакция физико-математическом литературы, 1983. 416 с.
3. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. Н. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.
4. Караваев Д.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Трошков К.В. Определение насыпной плотности терморасширенного графита // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. - 2013. - Т. 15, № 4(2). - С. 360-362.
5. Караваев Д.М., Матыгуллина Е.В., Макарова Л.Е., Нефедов Я.А., Черных А.А. Зависимость насыпной плотности порошка терморасширенного графита от скорости вращения гладких элементов измельчителя и продолжительности цикла измельчения // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: [www.science-education.ru/120-16031](http://www.science-education.ru/120-16031) (дата обращения: 01.10.2015).

6. Пат. 2531608 Российская Федерация, МПК G01N 3/08 (2006.01). Измельчитель / А. М. Ханов, Д. М. Караваев, Л. Е. Макарова, А. И. Дегтярев, В. А. Москалев, К. В. Трошков; патентообладатель Федер. гос. бюджет, образо-ват. учр. высш. проф. образования «Перм. нац. исслед. политехи. ун-т». № 2013121529/28; заявл. 07.05.2013;опубл. 27.10.14, Бюл. № 30. - 12 с.
7. Пат. 2544282 Российская Федерация, МПК G01N9/02 (2006.01). Устройство для определения насыпной плотности пористых материалов / А. М. Ханов, Д. М. Караваев, Л. Е. Макарова, А. И. Дегтярев, В. А. Москалев, О. Ю. Исаев, Д.В. Смирнов; патентообладатель Федер. гос. бюджет, образо-ват. учр. высш. проф. образования «Перм. нац. исслед. политехи. ун-т». № 2013143587/28; заявл. 26.09.13;опубл. 20.03.15, Бюл. № 8. - 9 с.
8. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов. В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. М.: Металлургия, 1987. 792 с.
9. Ханов А.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Караваев Д.М., Москалев В.А., Нестеров А.А., Смирнов Д.В., Исаев О.Ю. Особенности строения и использования терморасширенного графита // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2012. Т. 14. № 1. С. 92-106.
10. Ханов А.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Караваев Д.М., Смирнов Д.В. Особенности строения терморасширенного графита // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(4). С. 1119-1122.

**Рецензенты:**

Симонов Ю.Н., д.т.н., проф., зав. каф. МТО ПНИПУ, г. Пермь;  
Сиротенко Л.Д., д.т.н., проф. каф. МТиКМ ПНИПУ, г. Пермь.