

Богданов В. С., д-р техн. наук, проф.,  
Раков А. М., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

v.s\_bogdanov@mail.ru

В статье представлены результаты экспериментальных исследований вертикальной молотковой дробилки. Представлены уравнения регрессии для производительности по готовому продукту и потребляемой приводом мощности, а так же графические зависимости взаимодействия различных факторов на показатели эффективности работы дробилки.

**Ключевые слова:** вертикальная молотковая дробилка, уравнение регрессии.

Планирование эксперимента, осуществление экспериментальных исследований по запланированным данным, а так же обработка полученных в ходе эксперимента данных является очень важными при исследовании режимов работы любого оборудования. Нами проводились экспериментальные исследования вертикальной молотковой дробилки [1, 2], разработанной на кафедре МО с целью выявления влияния на показатели эффективности ее работы следующих факторов: количества ярусов с молотками -  $x_1$  ( $z$ ), зазор между ярусами -  $x_2$  ( $h$ ), минимальный

радиальный зазор между молотком и внутренней рабочей поверхностью -  $x_3$  ( $l$ ), частоты вращения ротора -  $x_4$  ( $n$ ).

По результатам проведенных экспериментов и их статистической обработки с использованием стандартных программ нами получены уравнения регрессии в виде  $Q_2(x_1; x_2; x_3; x_4)$ ,  $P(x_1; x_2; x_3; x_4)$ .

Уравнение регрессии для производительности по готовому продукту в кодированной форме имеет вид:

$$Q_2 = 448,7 + 16,99 \cdot x_1 + 31,7 \cdot x_2 - 61,21 \cdot x_3 + 22,55 \cdot x_4 - 4,83x_1^2 - 4,78 \cdot x_2^2 - 8,48 \cdot x_3^2 - 5,94 \cdot x_4^2 + (1) \\ + 0,89 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,36 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,81 \cdot x_1 \cdot x_4 + 1,62 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,21 \cdot x_2 \cdot x_4 + 1,46 \cdot x_3 \cdot x_4$$

Уравнение регрессии для потребляемой приводом дробилки мощности в кодированной форме имеет вид:

$$P = 2403,14 + 101,67 \cdot x_1 + 133 \cdot x_2 - 249,17 \cdot x_3 + 338,58 \cdot x_4 - 22,58 \cdot x_1^2 - 19,2 \cdot x_2^2 - 25,58 \cdot x_3^2 - 46,45 \cdot x_4^2 - (2) \\ - 17,88 \cdot x_1 \cdot x_2 - 5,25 \cdot x_1 \cdot x_3 + 11,5 \cdot x_1 \cdot x_4 - 7,63 \cdot x_2 \cdot x_3 - 11,63 \cdot x_2 \cdot x_4 - 18,75 \cdot x_3 \cdot x_4$$

После преобразований уравнение регрессии в натуральном виде для производительности по

готовому продукту (уравнение 3) и потребляемой приводом дробилки мощности (уравнение 4).

$$Q_2 = -361,49 + 55,76 \cdot z + 9971,13 \cdot h - 7637,46 \cdot l + 22,72 \cdot n - 4,83 \cdot z^2 - 97470,2 \cdot h^2 - 172980 \cdot l^2 - (3) \\ - 0,24 \cdot n^2 + 127,68 \cdot z \cdot h + 479,46 \cdot z \cdot l + 0,16 \cdot z \cdot n + 33035,7 \cdot h \cdot l - 34,46 \cdot h \cdot n + 41,61 \cdot h \cdot n$$

$$P = -6166,77 + 550,35 \cdot z + 72509,4 \cdot h - 28331,1 \cdot l + 229,286 \cdot n - 22,58 \cdot z^2 - 391885 \cdot h^2 - 521987 \cdot l^2 - 1,86 \cdot n^2 (4) \\ - 2553,57 \cdot z \cdot h - 750 \cdot z \cdot l - 2,3 \cdot z \cdot n - 155612 \cdot h \cdot l - 332,14 \cdot h \cdot n + 535,74 \cdot h \cdot n$$

Из уравнения 1 видно, что факторы  $x_1$ - количество ярусов ( $z$ , шт.),  $x_2$ - зазор между ярусами ( $h$ , м),  $x_4$  - частота вращения ротора дробилки ( $n$ ,  $c^{-1}$ ) имеют коэффициенты с положительным знаком. Следовательно увеличение каждого из этих факторов приводит к увеличению производительности дробилки по готовому продукту. Однако же,  $x_3$  - минимальный радиальный зазор между молотком и внутренней рабочей поверхностью ( $l$ , м) имеет отрицательный коэффициент, а это значит, что с изменением значения этого фактора будет снижаться производительность дробилки по готовому продукту.

На основании анализа величин уравнения регрессии (4.1) можно сделать вывод, что наибольшее влияние на изменение производительности оказывает фактор  $x_4$  - частота вращения ротора дробилки.

Очевидно, что с увеличением частоты вращения ротора будет увеличиваться и производительность по готовому продукту (рисунок 1, рисунок 2, рисунок 3)

Это объясняется тем, что с увеличением частоты вращения ротора дробилки возрастает кол-во взаимодействий, а так же сила взаимодействия молотка с кусками измельчаемого ма-

териала. Следовательно, увеличивается содержание мелкой фракции в готовом продукте, а значит и происходит рост производительности по готовому продукту.

Так с увеличением числа оборотов ротора с  $30 \text{ с}^{-1}$  до  $50 \text{ с}^{-1}$  при количестве ярусов  $z=6$  производительность увеличивается с  $380 \text{ кг/ч}$  до  $470 \text{ кг/ч}$ , т.е. на  $19,1\%$  (рисунок 1).

Увеличение производительности прослеживается при одновременном увеличении частоты вращения ротора дробилки и увеличении зазора между ярусами (рисунок 2).

С изменением частоты вращения ротора с  $30 \text{ с}^{-1}$  до  $50 \text{ с}^{-1}$  и зазоре между ярусами  $h = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , производительность по готовому продукту растет с  $302 \text{ кг/ч}$  по  $384 \text{ кг/ч}$ , т.е. на  $21,3\%$ , а при  $h = 42 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  растет с  $420 \text{ кг/ч}$  до  $519 \text{ кг/ч}$ , т.е. на  $19,1\%$ , что меньше чем при  $h = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  на  $2,2\%$ .

С увеличением частоты вращения ротора и минимального радиального зазора между молотком и внутренней рабочей поверхностью так же наблюдается рост производительности (рисунок 3). Так с увеличением частоты вращения ротора с  $30 \text{ с}^{-1}$  до  $50 \text{ с}^{-1}$  при  $l = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  производительность растет с  $475 \text{ кг/ч}$  до  $555 \text{ кг/ч}$ , т.е. на  $14,4\%$ , а при  $l = 33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  растет с  $229 \text{ кг/ч}$  до  $320 \text{ кг/ч}$ , т.е. на  $28,4\%$ . При совместном увеличении  $x_4$ - частоты вращения ротора и  $x_3$  - минимального радиального зазора между молотком и внутренней рабочей поверхностью происходит увеличение производительности на  $14\%$ .

Дальнейший анализ результатов производительности по готовому продукту показал, что:

а) с ростом факторов  $x_1, x_2, x_4$  происходит увеличение производительности дробилки по готовому продукту;

б) с ростом  $x_3$  происходит снижение производительности дробилки по готовому продукту;

с) наиболее интенсивное изменение производительности по готовому продукту наблюдается при изменении  $l$  с  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  до  $33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и минимальном кол-ве ярусов  $z=4$ , т.е. на  $56\%$ ;

д) наименьшее изменение производительности по готовому продукту наблюдается при изменении кол-ва ярусов с 4 штук до 8 штук при длине молотка  $l = 33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , т.е. на  $8,3\%$ ;

е) максимальной производительности по готовому продукту  $575 \text{ кг/ч}$  дробилка достигает при взаимодействии факторов  $x_2$  и  $x_3$  при  $h = 42 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и  $l = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

ф) минимальная производительность наблюдается при взаимодействии факторов  $x_2$  и  $x_3$  при минимальном значении зазора между ярусами и максимальным значением  $l$  и составляет  $205 \text{ кг/ч}$ .

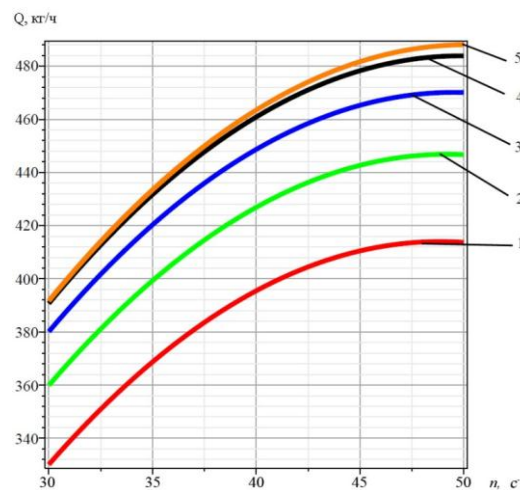


Рис. 1. Экспериментальная зависимость  $Q=f(n)$  при  $h = 28 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $l = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ : 1 -  $z = 4 \text{ ум.}$ ; 2 -  $z = 5 \text{ ум.}$ ; 3 -  $z = 6 \text{ ум.}$ ; 4 -  $z = 7 \text{ ум.}$ ; 5 -  $z = 8 \text{ ум.}$ .

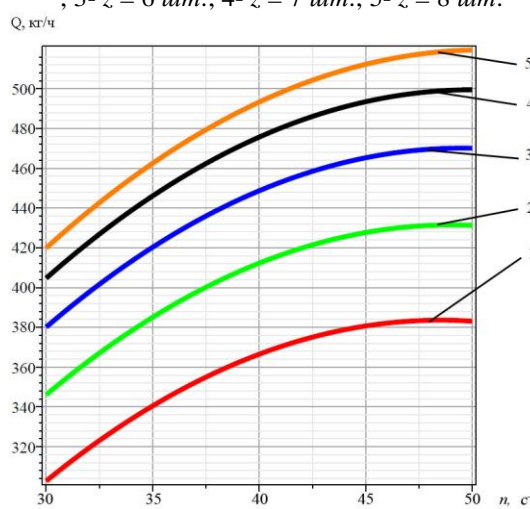


Рис. 2. Экспериментальная зависимость  $Q=f(n)$  при  $z=6 \text{ ум.}$ ;  $l = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ : 1 -  $h = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 -  $h = 21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 3 -  $h = 28 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 4 -  $h = 35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 5 -  $h = 42 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

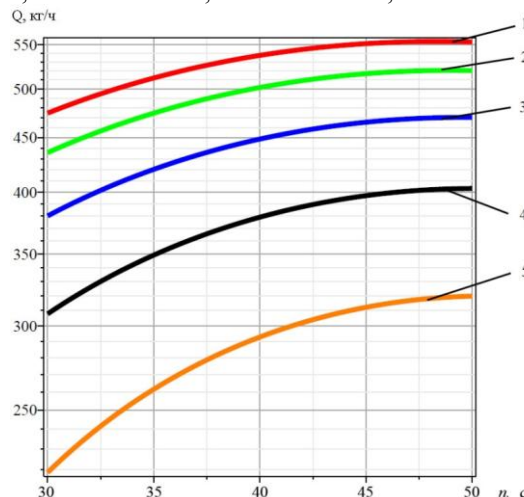


Рис. 3. Экспериментальная зависимость  $Q=f(n)$  при  $z=6 \text{ ум.}$ ;  $h = 28 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ : 1 -  $l = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 -  $l = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 3 -  $l = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 4 -  $l = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 5 -  $l = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

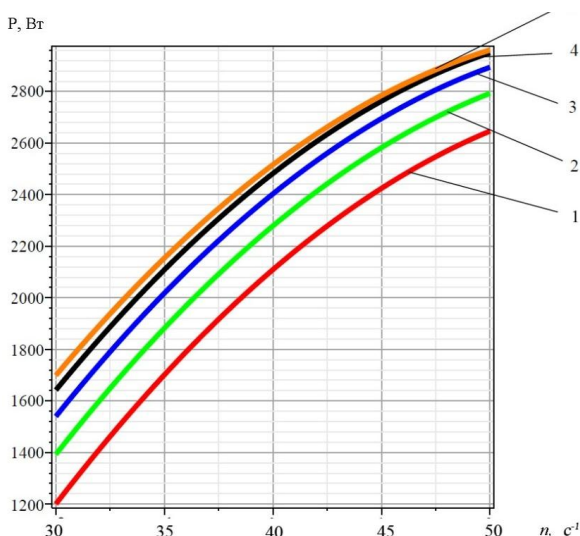


Рис. 4. Экспериментальная зависимость  $P=f(n)$  при  $h = 28 \cdot 10^{-3}$  м;  $l = 19 \cdot 10^{-3}$  м: 1 -  $z = 4$  шт.; 2 -  $z = 5$  шт.; 3 -  $z = 6$  шт.; 4 -  $z = 7$  шт.; 5 -  $z = 8$  шт.

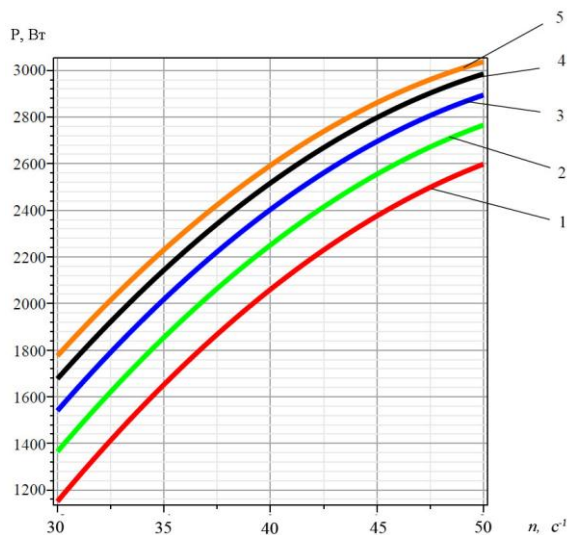


Рис. 5. Экспериментальная зависимость  $P=f(n)$  при  $z = 6$  шт.;  $l = 19 \cdot 10^{-3}$  м: 1 -  $h = 14 \cdot 10^{-3}$  м; 2 -  $h = 14 \cdot 10^{-3}$  м; 3 -  $h = 14 \cdot 10^{-3}$  м; 4 -  $h = 14 \cdot 10^{-3}$  м; 5 -  $h = 14 \cdot 10^{-3}$  м

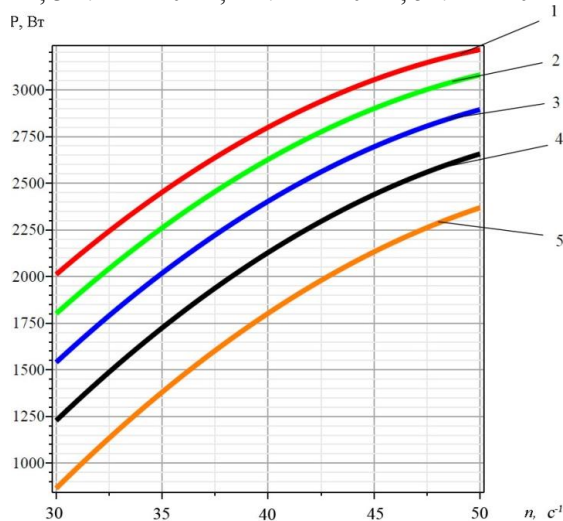


Рис. 6. Экспериментальная зависимость  $P=f(n)$  при  $z = 6$ ;  $h = 28 \cdot 10^{-3}$  м: 1 -  $l = 5 \cdot 10^{-3}$  м; 2 -  $l = 12 \cdot 10^{-3}$  м; 3 -  $l = 19 \cdot 10^{-3}$  м; 4 -  $l = 26 \cdot 10^{-3}$  м; 5 -  $l = 33 \cdot 10^{-3}$  м

Дальнейший анализ результатов производительности по готовому продукту показал, что:

а) с ростом факторов  $x_1, x_2, x_4$  происходит увеличение производительности дробилки по готовому продукту;

б) с ростом  $x_3$  происходит снижение производительности дробилки по готовому продукту;

в) наиболее интенсивное изменение производительности по готовому продукту наблюдается при изменении  $l$  с  $5 \cdot 10^{-3}$  м до  $33 \cdot 10^{-3}$  м и минимальном кол-ве ярусов  $z=4$ , т.е. на 56%;

г) наименьшее изменение производительности по готовому продукту наблюдается при изменении кол-ва ярусов с 4 штук до 8 штук при длине молотка  $l = 33 \cdot 10^{-3}$  м, т.е. на 8.3%;

д) максимальной производительности по готовому продукту 575 кг/ч дробилка достигает при взаимодействии факторов  $x_2$  и  $x_3$  при  $h = 42 \cdot 10^{-3}$  м и  $l = 5 \cdot 10^{-3}$  м;

е) минимальная производительность наблюдается при взаимодействии факторов  $x_2$  и  $x_3$  при минимальном значении зазора между ярусами и максимальным значением  $l$  и составляет 205 кг/ч.

Предварительный анализ уравнения регрессии (2) показал, что факторы  $x_1$ -количество ярусов ( $z$ , шт.),  $x_2$ - зазор между ярусами ( $h$ , м),  $x_4$ - частота вращения ротора дробилки ( $n$ ,  $c^{-1}$ ) имеют коэффициенты с положительным знаком. Следовательно увеличение каждого из этих факторов приводит к увеличению потребляемой приводом дробилки мощности. Однако же,  $x_3$ - минимальный радиальный зазор между молотком и внутренней рабочей поверхностью ( $l$ , м) имеет отрицательный коэффициент, а это значит, что с изменением значения этого фактора будет снижаться мощность потребляемая приводом.

Наибольшее влияние на мощность потребляемую приводом оказывает фактор  $x_4$ -частота вращения ротора дробилки.

В ходе анализа результатов экспериментов  $P=f(n)$  (рисунок 4, рисунок 5, рисунок 6) выявлено следующее.

Увеличение частоты вращения ротора при любом количестве ярусов с молотками приводит к увеличению потребляемой приводом мощности (рисунок 4). Так, например, увеличивая частоту вращения ротора с  $30 c^{-1}$  до  $50 c^{-1}$  при кол-ве ярусов  $z = 6$  штук, мощность увеличивается с 1540 Вт до 2880 Вт, т.е. на 46,5%.

Увеличение частоты вращения ротора при любом значении расстояний между ярусами (рисунок 5) интенсивнее растет, чем в предыдущем случае. При  $h = 14 \cdot 10^{-3}$  м потребляемая мощность меняется с 1160 Вт до 2600 Вт, т.е. на 55,4%, а при  $h = 42 \cdot 10^{-3}$  м с 1780 Вт до 3020 Вт, т.е. на 41,1%.

Явное увеличение потребляемой приводом мощности так же происходит с увеличением частоты вращения ротора при любом минималь-

ном радиальном зазоре между молотком и внутренней рабочей поверхностью (рисунок 6). При  $l = 19 \cdot 10^{-3}$  м происходит рост потребляемой мощности с 1550 Вт до 2875 Вт, т.е. 46,1%;

Проведенный анализ результатов мощности, потребляемой приводом показал, что:

а) с ростом факторов  $x_1, x_2, x_4$  происходит увеличение потребляемой приводом дробилки мощности;

б) с ростом  $x_3$  происходит снижение потребляемой приводом дробилки мощности;

с) наиболее интенсивное изменение потребляемой приводом мощности наблюдается при изменении частоты вращения ротора с  $30 \text{ с}^{-1}$  до  $50 \text{ с}^{-1}$  и минимальном кол-ве ярусов  $z = 4$ , т.е. на 54,5%;

д) наименьшее изменение потребляемой приводом мощности наблюдается при изменении количества ярусов с молотками от 4 до 8 штук и минимальной частоте вращения ротора  $n = 30 \text{ с}^{-1}$ , т.е. на 10,8%;

е) своего пика потребляемая мощность достигает при максимальных оборотах ротора  $n=50 \text{ с}^{-1}$  и минимальном значении радиального зазора между молотком и внутренней рабочей поверхностью  $l=5 \cdot 10^{-3}$  м и составляет 3480 Вт;

ф) минимальная потребляемая мощность наблюдается при минимальных значениях частоты вращения ротора  $n=30 \text{ с}^{-1}$  и значении радиального зазора между молотком и внутренней рабочей поверхностью  $l=33 \cdot 10^{-3}$  м мм и составляет 830 Вт.

Проведенные исследования вертикальной молотковой дробилки позволят выбрать рациональный режим ее работы. Что позволит получить максимальную производительность при минимальных энергетических затратах

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент на полезную модель а.с. № 102540, МПК В02С13/14, Вертикальная молотковая дробилка/ Богданов В.С., Раков А.М., заявлено 21.09.2010 г., опубл. 10.03.2011 г.

2. Богданов В.С. Вертикальная молотковая мельница / В.С. Богданов, А.М. Раков // материалы межвузовского сборника статей, Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов, БГТУ им. Шухова, Белгород, 2010, с. 56-59.