

Прокопенко В.С., аспирант,
Шарапов Р.Р., аспирант,
Агарков А.М., аспирант,
Шарапов Р.Р., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ

ptdm_zavkaf@mail.ru

В настоящее время по объемам потребления цемент занимает ведущее место среди строительных материалов, однако на его производство затрачивается большое количество энергии, как на обжиг, так и на измельчение на различных переделах. Снизить расход электроэнергии можно, переведя помол клинкера и добавок в замкнутый цикл. Однако, учитывая большое количество внешних факторов обеспечить максимальную эффективность использования большого количества совместно работающего сложного оборудования довольно сложно.

Для оптимизации процесса получения тонкодисперсных порошков предлагается строить математические модели, полученные на основе результатов экспериментальных исследований, учитывающих особенности входящих в линию аппаратов. На основе этих математических моделей предлагается строить функции цели, обеспечивающие оптимальные условия работы как всего помольного оборудования, так и отдельных элементов, входящих в его состав.

Ключевые слова: тонкодисперсные порошки, уравнения регрессии, замкнутый цикл, центробежный сепаратор, производительность, удельный расход электроэнергии, эффективность.

Введение. Получение тонкодисперсных порошков с минимальными затратами в современных условиях развития промышленности является весьма актуальной задачей [1]. В большинстве случаев это возможно только с применением замкнутого цикла измельчения [2, 3]. Однако, учитывая большое количество внешних факторов обеспечить максимальную эффективность использования большого количества совместно работающего сложного оборудования довольно сложно [4, 5]. Решение таких задач возможно при составлении математических моделей и нахождении оптимумов, при которых наблюдается максимальная эффективность работы рассматриваемого оборудования.

Учитывая сложность процессов, происходящих в каждом из аппаратов, входящего в технологическую линию производства тонкодисперсного порошка, аналитические выражения, описывающие весь процесс, получаются настолько громоздкими, что за ними теряется первоначальный смысл самого мероприятия.

Методология. Для оптимизации процесса получения тонкодисперсных порошков удобно строить математические модели, полученные на основе результатов экспериментальных исследований, учитывающих особенности входящих в линию аппаратов.

Основная часть. Полученные в результате проведенных экспериментов уравнения регрессии позволяют судить о величине влияния раз-

личных факторов и эффектов их взаимодействия на величину параметров P , Q , R и их производных.

Но, учитывая большое количество членов уравнений регрессии, и невозможности подбора оптимума простым перебором величин факторов нами произведена оптимизация эксперимента при условиях минимума потребляемой мощности P , максимума производительности Q шаровой мельницы замкнутого цикла измельчения при гарантированном качестве готового продукта, определяемого параметром R . Задача состоит в том, чтобы найти такое соотношение факторов, при котором наблюдалась бы максимальная эффективность процесса измельчения: минимум потребляемой энергии при максимуме производительности. Для поиска оптимума функции цели, факторное пространство, составляющее собой область допустимых значений функции, представим в виде гиперкуба со стороной, равной четырем единицам.

Для решения задачи оптимизации процесса измельчения в шаровых мельницах замкнутого цикла необходимо сформулировать критерий оптимальности, другими словами – дать качественную оценку эффективности процесса при тех или иных значениях регулируемых параметров.

В качестве критерия оптимальности может быть принята следующая целевая функция:

$$F(c, V, k, v, \psi, L, n, \mu) = a_1 \frac{P}{Q} + a_2 (R - R^*)^2 + a_3 f(c, V, k, v, \psi, L, n, \mu), \quad (1)$$

где a_1, a_2, a_3 – весовые коэффициенты, регулирующие значимость (вклад) того или иного слагаемого и учитывающие различие в абсолютных значениях и размерностях соответствующих величин; P – мощность, потребляемая установкой, рассчитываемая по уравнению регрессии; Q – производительность помольного агрегата, рассчитываемая по уравнению регрессии; R – качество конечного продукта, рассчитываемое по уравнению регрессии; R^* – требуемое качество готового продукта и задаваемое при расчете; f – функция от входных параметров, ограничивающая поиск оптимизирующих значений гиперкубом; $c, V, k, v, \psi, L, n, \mu$ – циркуляционная нагрузка, скорость воздуха в барабане мельницы, соотношение длин камер мельницы, живое сечение перегородки, относительная частота вращения барабана мельницы, расход сепарационного воздуха, частота вращения ротора сепаратора, аэродинамический параметр центробежного сепаратора.

Оптимизация процесса измельчения осуществлялась путем минимизации функции $F(c, V, k, v, \psi, L, n, \mu)$ наискорейшего спуска [6]. За счет выбора значений коэффициентов a_1, a_2, a_3 было рассмотрено несколько видов функций F – критериев оптимальности, имеющих качественные отличия. Прежде чем перейти к обсуждению результатов расчетов, необходимо сделать следующее замечание. Поскольку экспериментальная установка, являясь в некотором смысле геометрически подобным помольным агрегатом промышленным установкам, и динамическим подобием не обладает, нас интересовали не абсолютные значения входных факторов, а тенденции их изменения при изменении требований к результатам или технологическим параметрам процесса измельчения. С учетом сказанного был выбран тип функции и организованы численные расчеты.

Результаты первой серии расчетов приведены на рисунке. Расчеты выполнены при $a_1 = 0, a_2 = 10, a_3 = 0$ для различных значений R . Тем самым изучалось влияние значения входных факторов на повышение или уменьшение тонкости помола готового продукта.

Как видно на рис. 1, а, для получения продукта измельчения с малыми значениями остатков на сите 008, необходимо обеспечить минимальную циркулирующую в системе нагрузку; скорость воздуха в барабане мельницы, смещенную в сторону меньших значений параметра V ; минимальную длину камеры тонкого измельчения, соответствующую принятому плану эксперимента; минимальную транспортирующую способность наклонной межкамерной перегородки, определяемую параметром v , конструк-

ция которой должна обеспечивать циркуляцию измельчаемого материала из первой камеры во вторую и наоборот и минимальную частоту вращения барабана мельницы ψ . Это обеспечивает более длительное время нахождения материала в барабане мельницы и, соответственно, более высокую степень измельчения.

На рис. 1, б представлены технологические характеристики процесса измельчения в шаровых мельницах замкнутого цикла при соответствующих значениях входных факторов.

Данные значения входных факторов объясняются следующим: для обеспечения большей тонкости помола в барабане мельницы должно быть минимальное количество измельчаемого материала, что обеспечивается при минимальной циркуляционной нагрузке. Скорость воздуха в мельнице при этом не должна обеспечивать интенсивный вынос измельчаемого материала из барабана мельницы, что увеличивает время нахождения материала в барабане мельницы. Увеличение длины камеры тонкого измельчения позволяет увеличить тонкость помола за счет более длительного воздействия мелкошаровой загрузки на измельчаемый материал, а снижение транспортирующей способности перегородки v за счет возможной циркуляции из первой камеры во вторую и обратно, при провороте барабана мельницы на 360° также увеличивает время нахождения материала в мельнице и, соответственно, приводит к повышению дисперсности измельчаемого материала.

Минимальные остатки измельчаемого материала на сите 008 получаются при меньших частотах вращения барабана мельницы ψ , за счет преобладания истирающего воздействия мелушей среды на измельчаемый материал.

Например, для получения продукта с R в 5 % с минимальным расходом электроэнергии необходима циркуляционная нагрузка c , равная 50 %; скорость воздуха V в барабане мельницы – 0,56 м/с; соотношение длин камер (l_2 / l_1) – 1,4; живом сечении перегородки v – 15 % и относительной частоте вращения барабана мельницы ψ – 0,665.

С увеличением циркуляционной нагрузки наблюдается увеличение параметра R . При этом рост параметра c аналогично параметру V вызывает загромождение материала за счет увеличения среднего размера выносимой из барабана мельницы частицы измельчаемого материала. Анализ выражения позволяет утверждать, что при загромождении материала должна сокращаться и камера тонкого измельчения и возрастать относительная частота вращения барабана мельницы. Во-первых, это объясняется тем, что возрастает массовая доля измельчаемого материала в

барабане мельницы (возрастает циркуляционная нагрузка) на что необходима бóльшая доля ударного воздействия мелушей среды и что обеспечивается бóльшей длиной первой камеры

и, во-вторых, большей частотой вращения барабана мельницы, что увеличивает, соответственно, ударное воздействие.

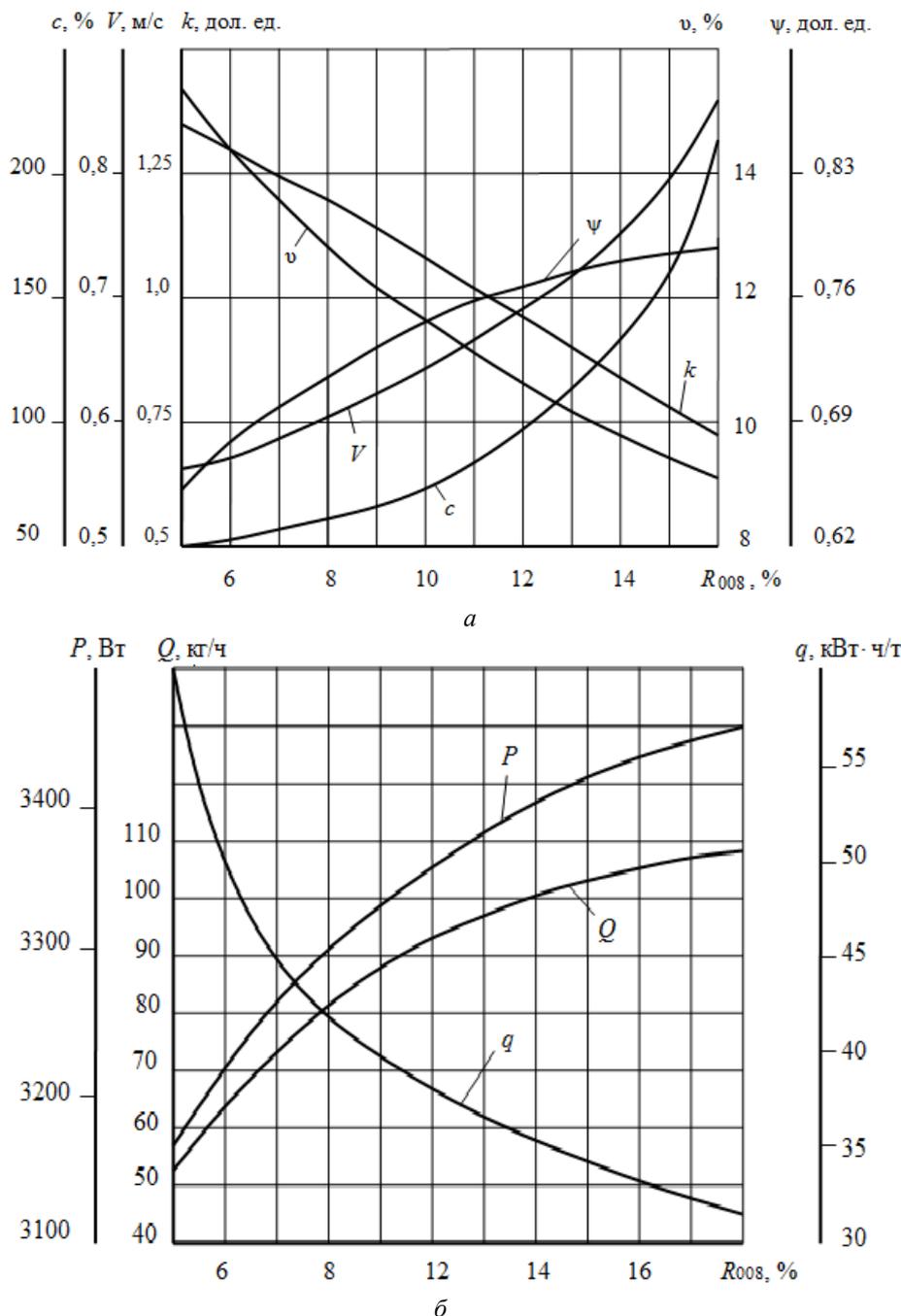


Рис. 1. Зависимость оптимизирующих значений входных факторов (а) и значений параметров процесса измельчения в шаровых мельницах замкнутого цикла (б) от тонкости помола готовой продукции при минимизации удельного расхода энергии

Подставляя найденные в результате решения целевой функции значения варьируемых факторов при ее минимизации (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) в соответствующие уравнения регрессии определим потребляемую установкой мощность P , ее производительность при соответствующем качестве готового продукта Q , и удельный расход энергии q на помол при обеспечении заданных качественных показателей помольной системы

(см. рис. 1, б).

Увеличение производительности установки сопровождается и ростом уровня потребляемой ею мощности. При этом максимальный вклад в увеличение параметра P оказывают увеличение частоты вращения барабана мельницы и скорость воздуха в барабане мельницы и, в меньшей мере – рост циркуляционной нагрузки. Два оставшихся параметра – k и v существенного

влияния на величину P не оказывают, так как не изменяют характер движения мелушей загрузки при измельчении материала. С загрузлением материала от 5 до 16 % рост потребляемой мощности составляет 9,5 %, т.е. от 3154 до 3456 Вт.

С целью оптимизации работы помольного агрегата замкнутого цикла для получения минимального расхода электроэнергии в формуле (1) примем следующие значения весовых коэффициентов: $a_1 = 10$, $a_2 = 0$, $a_3 = 0$. Расчет показал, что минимальный расход электроэнергии наблюдается при $c = 208$ %; $V = 0,87$ м/с; $k = 1,45$; $v = 8$ % и $\psi = 0,85$ и составляет 24,28 кВт·ч/т. При этом производительность установки составляет 100,40 кг/ч, а потребляемая мощность – 2437 Вт.

Максимальная производительность шаровой мельницы составляет 111,36 т/ч при следующих значениях варьируемых факторов: $c = 110$ %; $V = 0,9$ м/с; $k = 0,78$; $v = 8$ % и $\psi = 0,75$. Мощность, потребляемая установкой, при этом составляет 3125 Вт, при удельном расходе электроэнергии q , равном 28,06 кВт·ч/т.

При оптимизации работы только центробежного сепаратора (шаровая мельница была отключена, а питание центробежного сепаратора осуществлялось автономно) при удельной поверхности порошка, равной 3500 см²/г максимальная производительность Q воздушного центробежного сепаратора наблюдается при следующих значениях варьируемых параметров: расходе сепарационного воздуха L , равном 375,4 м³/ч; частоте вращения ротора сепаратора n , равной 732,2 об/мин; аэродинамическом параметре сепаратора μ , равном 93,14 % и составляет 366,5 кг/ч.

Эффективность разделения центробежного сепаратора при этих значениях составляет 74,5 %.

Максимальная эффективность разделения E воздушного центробежного сепаратора наблюдается при следующих значениях варьируемых параметров: расходе сепарационного воздуха L , равном 355,1 м³/ч; частоте вращения ротора сепаратора n , равной 1348,3 об/мин; аэродинамическом параметре сепаратора μ , равном 79,68 %

и составляет 86,33 %.

Производительность центробежного сепаратора при этих значениях составляет 302,56 кг/ч при удельной поверхности готового продукта, равной 4200 см²/г.

Выводы. В ходе проведения исследований были получены уравнения регрессии работы помольного агрегата замкнутого цикла на основе шаровой мельницы и центробежного сепаратора и предложена функция цели, позволяющая определять оптимальные условия работы как самого помольного агрегата в целом, так и его отдельных элементов. Определены значения уровней факторов, при которых наблюдаются минимальная энергоемкость всего помольного агрегата, его максимальная производительность, максимальная производительность центробежного сепаратора и его максимальная эффективность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качаев А.Е., Севостьянов В.С. Дезинтегратор с ударно-сдвиговым воздействием на измельчаемый материал // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. №1. С. 102–105.
2. Шарапов Р.Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла. Монография. Белгород. Изд-во БГТУ, 2008. 270 с.
3. Walter H. Duda. Cement – Data – Book. / Walter H. Duda. 1985. Vol. 1. 617 p.
4. Шарапов Р.Р., Уваров А.А. Аспирационные режимы шаровых мельниц замкнутого цикла и их влияние на кинетику измельчения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. №4. С. 58–60.
5. Романович А.А. Пресс-валковый измельчитель с устройством для дезагломерации материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 74–77.
6. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988. 127 с.