

УДК 621.926

Д. В. Семененко, ассистент (БГТУ);

П. Е. Вайтехович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований горизонтальных планетарных мельниц, позволившие определить рациональные конструктивные и технологические параметры данного типа помольных агрегатов, дать рекомендации по их проектированию и эффективной эксплуатации.

Results of experimental researches of horizontal planetary mills, allowed to define rational constructive and technological parameters of the given type of crushing units are presented, to give recommendations about their designing and effective operation.

Введение. Планетарные измельчители с горизонтальным расположением валов являются разновидностью барабанных мельниц и могут работать в каскадном, водопадном или центрифугальном режимах [1–3]. Каждый из них характеризуется определенным способом воздействия мелющих тел на частицы измельчаемого материала. Однако эффективными являются водопадный и центрифугальный режимы. Поэтому для каждого из них проводился отдельный комплекс экспериментальных исследований.

Основная часть. При водопадном режиме работы эффективность измельчения в первую очередь зависит от угла подъема мелющих тел по стенке барабана и высоты их падения после отрыва. Эти параметры связаны с угловой скоростью барабана. Из опыта эксплуатации обычных шаровых мельниц известно, что наилучшие показатели процесса измельчения достигаются при угловой скорости барабана, составляющей 80–120% от максимальной возможной (второй критической скорости) для водопадного режима [4, с. 270]. Поэтому при проведении экспериментальных исследований в качестве рабочей была выбрана угловая скорость барабанов, соответствующая началу центрифугального движения мелющих тел (второй критической скорости).

Опыты проводились в планетарной мельнице с внешней и внутренней обкаткой помольных барабанов, внутренний диаметр D_b которых составлял 100 мм, длина – 200 мм, объем – 1,57 л. Время помола равнялось 10 мин, степень загрузки помольной камеры материалом – 14% (с учетом пустот между частицами сырья), а ее угловая скорость – 18,34 рад/с (вторая критическая скорость). Соотношение радиусов барабана r_b и приводного колеса r_k , описываемое геометрическим критерием b , равнялось единице ($b = r_b / r_k = 1$). Диаметр шаров составлял 16,5 мм, а расстояние между осями барабанов – 240 мм. Для случая внешней обкатки соотношение радиусов барабана r_b

и обкатываемой поверхности R , характеризующее геометрическим критерием k , равнялось 0,714 ($k = r_b / R = 0,714$), а для внутренней – $k = 0,294$. В качестве основного измельчаемого материала был выбран гипсовый камень с размером частиц 3–5 мм.

За эффективность измельчения принята доля материала E , прошедшего через сито с размером ячеек 100 мкм, определяемая с помощью ситового анализа.

Кроме того, в отдельных сериях опытов дополнительно определялась удельная поверхность готового продукта на приборе ПСХ-8А конструкции Ходакова с помощью метода воздухопроницаемости, основанного на установленной Козени – Карманом зависимости скорости фильтрации воздуха через слой порошка от удельной поверхности последнего [5].

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием статистических методов, в частности, регрессионного анализа [6, с. 676]. Средняя величина определяемого параметра рассчитывалась по 5–7 его значениям, полученным в результате экспериментов. После усреднения параметра рассчитывалась выборочная дисперсия и критерий Кохрена. В случаях, когда его величина превышала табличное значение, обрабатывалось максимально выпадающее значение параметра и проводился пересчет до выполнения условия $G_{\max} < G_{\text{табл}}$, где G – критерий Кохрена.

Оценка адекватности эмпирических уравнений, полученных при обработке экспериментальных зависимостей, проводилась путем расчета критериев Стьюдента и Фишера. При этом критерий Стьюдента определялся только для более сложных уравнений в виде полинома с большим числом коэффициентов. Во всех остальных случаях рассчитывался только критерий Фишера, представляющий собой соотношение дисперсий адекватности и восстановления. При выполнении условия $F < F_{\text{табл}}$ экспериментально-статистическая модель считалась адекватной.

Первым этапом исследований было определение влияния на эффективность помола степени заполнения барабана мелющими шарами ϵ , представляющей собой отношение объема мелющих тел (шаров) $V_{ш}$ к внутреннему объему барабана V_b , выраженное в процентах:

$$\epsilon = \frac{V_{ш}}{V_b} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Полученные результаты (табл. 1) показали, что для обоих способов обкатки графические зависимости $E = f(\epsilon)$ проходят через максимум. Причем при внешней обкатке показатели процесса помола выше, чем при внутренней. Наилучшие результаты были получены при $\epsilon = 38-50\%$. С учетом того, что степень заполнения материалом принята равной 14% , то выбрав из этого диапазона значение $\epsilon = 42\%$, можно считать наиболее рациональным соотношение $V_{ш} : V_M = 3 : 1$. Т.е. общая степень заполнения барабана a была принята равной 56% ($a = 42 + 14 = 56\%$).

Таблица 1

Влияние степени заполнения барабана мелющими телами на эффективность помола

$E, \%$	$\epsilon, \%$					
	28,0	32,7	37,4	42,0	46,7	51,4
Внешняя обкатка	32,4	36,0	39,2	40,4	40,8	37,2
Внутренняя обкатка	27,7	30,7	32,8	33,8	34,0	31,7

Уравнение, описывающее зависимость $E = f(\epsilon)$, имеет следующий вид:

– при внешней обкатке:

$$E = -0,0004\epsilon^3 + 0,0068\epsilon^2 + 1,5376\epsilon - 7,6812; \quad (2)$$

– внутренней обкатке:

$$E = -0,0002\epsilon^3 + 0,0084\epsilon^2 + 1,6891\epsilon - 9,1837. \quad (3)$$

Следующим этапом исследований было определение влияния диаметра шаров $d_{ш}$ на эффективность процесса помола E (табл. 2). Эти эксперименты проводились на базовом варианте мельницы с внешней обкаткой барабанов, идентичными режимными параметрами и рациональной степенью заполнения, указанной выше. Они позволяют сделать вывод, что с увеличением диаметра мелющего тела $d_{ш}$ до некоторой величины происходит повышение эффективности процесса измельчения, а затем наблюдается ее снижение. На основании установленной закономерности можно сделать предположение о том, что наилучшие показатели процесса помола достигаются при некотором рациональном (сбалансированном) соотношении между количеством помольных тел, их размерами и внутренним диаметром барабана. Из полученных результатов следует, что этот результат наблюдается при соотношении $D_b / d_{ш} \approx 6$. Также следует отметить, что соотношение размеров мелющих тел и частиц материала должно быть не менее, чем $2,5 : 1,0$.

ношении между количеством помольных тел, их размерами и внутренним диаметром барабана. Из полученных результатов следует, что этот результат наблюдается при соотношении $D_b / d_{ш} \approx 6$. Также следует отметить, что соотношение размеров мелющих тел и частиц материала должно быть не менее, чем $2,5 : 1,0$.

Таблица 2

Зависимость эффективности помола E от диаметра шаров $d_{ш}$ при $b = 1,0$

$E, \%$	$d_{ш}, \text{мм}$			
	5,5	11,0	16,5	18,0
Внешняя обкатка	9,4	30	40,4	37,5
Внутренняя обкатка	8,2	25,4	33,8	31,7

Для подтверждения сделанного предположения было принято решение провести аналогичные помолы при других диаметрах барабанов $D_b = 60; 80; 120$ мм, которым соответствуют значения критерия $b = 0,6; 0,8; 1,2$ ($b = 1,0$ для $D_b = 100$ мм). Таким образом, полученные результаты (табл. 3) позволили установить и влияние параметра b на эффективность измельчения E . А именно при внешней обкатке барабанов уменьшение величины геометрического критерия b приводит к увеличению эффективности E , а при внутренней – к уменьшению E . Эта закономерность отражена в табл. 4.

Таблица 3

Воздействие диаметра шаров $d_{ш}$ и диаметра барабана D_b на эффективность помола E при водопадном режиме работы

$E, \%$	$d_{ш}, \text{мм}$			
	5,5	11,0	16,5	18,0
$D_b = 60$ мм	12,6	50,8	48,4	46,6
$D_b = 80$ мм	11,1	45,8	46,2	44,8
$D_b = 100$ мм	9,4	30	40,4	37,5
$D_b = 120$ мм	8,7	27,8	37,4	40,2

Таблица 4

Влияние геометрического критерия b на эффективность помола E при водопадном режиме работы

$E, \%$	b			
	0,6	0,8	1,0	1,2
Внешняя обкатка	48,4	46,2	40,4	37,4
Внутренняя обкатка	27,6	31,2	33,8	38,1

Для исследования влияния геометрического критерия k на эффективность процесса помола

были проведены опыты на всех четырех типоразмерах барабанов и приводных колес. Приводные колеса монтировались на валах поочередно таким образом, чтобы величина геометрического критерия b всегда была равной единице. Для каждой пары барабанов и приводных колес рассчитывалось значение второй критической скорости, при которой и проводилось измельчение частиц загружаемого материала. Полученные результаты свидетельствуют о том, что повышение величины геометрического критерия k при внешней обкатке барабанов приводит к росту эффективности процесса помола (табл. 5), а при внутренней – к ее снижению (табл. 6).

Таблица 5
Зависимость эффективности помола E от геометрического критерия k при внешней обкатке барабанов и водопадном режиме

Параметр	k			
	0,333	0,5	0,714	1,0
E , %	29,7	33,6	40,4	52

Таблица 6
Воздействие геометрического критерия k на эффективность помола E при внутренней обкатке барабанов и водопадном режиме

Параметр	k			
	0,2	0,25	0,294	0,333
E , %	43,4	39,4	33,8	27,8

Следующим этапом работы было определение влияния на эффективность помола угловой скорости барабана ω . Результаты исследований для разных способов обкатки, представленные в табл. 7, показали, что эффективность помола при внешней обкатке выше, чем при внутренней. Причем максимальное значение эффективности достигается при $\omega = 22$ рад/с. Это даже несколько выше, чем граничная скорость между водопадным и центрифугальным режимами ($\omega = 18,34$ рад/с).

Таблица 7
Влияние угловой скорости барабана ω на эффективность помола E при водопадном режиме работы

E , %	ω , рад/с					
	11,0	14,7	18,3	22,0	25,7	29,3
Внешняя обкатка	19,8	31,5	40,4	42,1	28,2	14,4
Внутренняя обкатка	15,2	25,4	33,8	37,3	22,8	12,2

Уравнение, описывающее зависимость $E = f(\omega)$, имеет следующий вид:

– при внешней обкатке:

$$E = 0,0012\omega^4 - 0,0972\omega^3 + 2,6445\omega^2 + 26,259\omega - 100,91; \quad (4)$$

– внутренней обкатке:

$$E = 0,0011\omega^4 - 0,0951\omega^3 + 2,6357\omega^2 + 27,136\omega - 104,72. \quad (5)$$

Все предыдущие экспериментальные исследования проводились при фиксированном времени помола $t = 10$ мин. Однако при проведении процесса в мельницах периодического действия важным параметром является кинетика измельчения. Кроме того, при разработке новых конструкций помольных агрегатов всегда встает вопрос об их эффективности при обработке материалов с разными физическими свойствами. В связи с этим была проведена серия помолов разной продолжительности. Причем в качестве измельчаемых материалов были взяты гипсовый камень (ГК), клинкер (К) и стеклобой (С) с размерами частиц 3–5 мм, твердость которых по таблице Мооса составляет 2, 3 и 6 единиц соответственно. Полученные результаты (табл. 8) свидетельствуют о том, что с увеличением времени помола и снижением твердости материала эффективность возрастает, причем ее значение при внешней обкатке несколько выше, чем при внутренней.

Таблица 8
Взаимосвязь времени помола t и твердости материала с эффективностью E при водопадном режиме работы

E , %	t , мин				
	1	3	5	10	20
ГК (внеш. обкатка)	3,5	11,7	20,4	40,4	52,2
ГК (внутр. обкатка)	3,0	10,1	17,1	33,8	43,8
К (внеш. обкатка)	2,4	6,2	10,4	17,4	32,0
С (внеш. обкатка)	1,5	2,7	4,8	10,5	23,3

Уравнение, описывающее зависимость $E = f(t)$ для гипсового камня, имеет следующий вид:

– при внешней обкатке:

$$E = 0,0002t^4 - 0,0169t^3 + 0,2011t^2 + 3,506t - 0,1904; \quad (6)$$

– внутренней обкатке:

$$E = 0,0004t^4 - 0,0055t^3 + 0,0419t^2 + 3,6597t - 0,623. \quad (7)$$

Проведенные экспериментальные исследования водопадного режима дают возможность сделать однозначный вывод о том, что при водопадном режиме работы горизонтальной планетарной мельницы внешняя обкатка барабанов является эффективнее внутренней. Кроме того,

полученные результаты позволяют разработать рекомендации по эксплуатации данного типа помольных агрегатов. Так, для достижения максимальной эффективности процесса помола в водопадном режиме соотношение объемов мелющих тел и измельчаемого материала должно составлять 3 : 1, а степень заполнения барабанов шарами $\epsilon = 38\text{--}50\%$. Причем диаметр последних должен быть примерно в шесть раз меньше диаметра барабана, а оптимальная угловая скорость на 20% больше той, при которой начинается центрифугальный режим. При проектировании планетарных мельниц с внешней обкаткой барабанов размеры основных деталей и узлов следует выбирать таким образом, чтобы величина геометрического критерия k была близкой к единице, а $b \leq 0,8$.

Для исследования центрифугального режима использовался базовый вариант мельницы. Однако в качестве мелющих тел были приняты шары диаметром 18 мм. Такой размер помольных тел был выбран в качестве основного после пробных помолов, результаты которых показали, что для базового варианта мельницы наилучшие результаты достигаются при $d_{ш} = 18$ мм. Длительность измельчения была равной 1 мин. Столь небольшой промежуток времени выбран потому, что уже через несколько минут помола все частицы материала достигают размеров менее 100 мкм и, согласно принятому критерию оценки эффективности процесса, являются готовым продуктом. Но для изучения влияния любого параметра на процесс помола необходимо, чтобы значительная доля частиц сырья была больше указанного размера. Лишь в этом случае можно увидеть воздействие, которое оказывает изменение его величины на эффективность измельчения. И время $t = 1$ мин является рациональным с этой точки зрения. Угловая скорость барабанов ω была выбрана равной 180 рад/с. Эта максимальное значение данного параметра, при котором работа мельницы не сопровождалась высоким уровнем шума и сильными вибрациями. В качестве базовой была принята общая степень заполнения барабана материалом и шарами $a = 50\%$.

Для оценки влияния соотношения объемов материала V_M и мелющих тел $V_{ш}$ на эффективность процесса помола (зафиксировав при этом значение $a = 50\%$) был введен следующий параметр:

$$c = V_M / V_{ш}. \quad (8)$$

Результаты исследования влияния параметра c на эффективность измельчения показали (табл. 9), что внутренняя обкатка барабанов является эффективнее внешней. Причем чем

больше мелющих тел в помольной камере, тем выше эффективность процесса помола.

Таблица 9

Влияние соотношения объемов материала и мелющих тел на эффективность помола E

$E, \%$	c					
	0,5	1	2	3	4	5
Внешняя обкатка	67,4	60,6	51,2	43,4	34,9	29,4
Внутренняя обкатка	94,9	85,3	74,4	64,5	53,0	43,0

Уравнение, описывающее зависимость $E = f(c)$, имеет вид:

– при внешней обкатке:

$$E = -8,394c - 69,501; \quad (9)$$

– внутренней обкатке:

$$E = -11,197c - 98,11. \quad (10)$$

После проведения серии помолов в большинстве случаев были получены порошки с высокой дисперсностью частиц, поэтому было принято решение определить для измельченного материала удельную поверхность. Полученные результаты представлены в табл. 10. Они свидетельствуют о том, что даже после 1 мин помола удельная поверхность материала достигает больших значений и, в частности, для гипсового камня ее величина может превышать $6000 \text{ см}^2/\text{г}$.

Таблица 10

Зависимость удельной поверхности $S_{уд}$ измельченного материала от соотношения объемов материала и мелющих тел

$S_{уд}, \text{ см}^2/\text{г}$	c					
	0,5	1	2	3	4	5
Внешняя обкатка	5094	4732	4365	3912	3408	2788
Внутренняя обкатка	6032	5762	5387	4973	4423	3889

Следует отметить, что увеличение массы мелющих тел в барабане будет приводить не только к росту эффективности процесса помола, но и динамических нагрузок, воспринимаемых деталями планетарной мельницы. А это, в свою очередь, способствует ускоренному износу последних. Кроме того, по мере уменьшения величины c при неизменном значении a будет происходить сокращение объема материала как подаваемого на помол, так и измельченного до требуемой тонины, что негативно скажется на производительности планетарной мельницы. Поэтому необходимо выбрать наиболее рациональное значение c , при котором пространство помольного барабана используется наиболее эффективно, а объем мелющих тел минимален. Для выполнения поставленной задачи был введен новый параметр q , представляющий собой

соотношение объемов готового продукта $V_{ГП}$ (частиц размером менее 100 мкм), получаемого в единицу времени $t = 1$ мин, и барабана V_B :

$$q = V_{ГП} / V_B. \quad (11)$$

Этот параметр представляет собой удельную производительность мельницы. На основании данных табл. 9 по формуле (11) были проведены расчеты q , результаты которых представлены в табл. 11.

Максимальная удельная производительность достигается при значениях $c = 2-3$ (табл. 11). Однако с точки зрения минимизации негативного воздействия динамических нагрузок на детали планетарной мельницы при одновременном обеспечении высокой удельной производительности рациональной является величина $c = 3$. Поэтому дальнейшие исследования проводились при этом соотношении объемов материала и мелющих тел.

Таблица 11

Зависимость удельной производительности q от параметра c

$q, \text{ м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{мин}$	c					
	0,5	1	2	3	4	5
Внешняя обкатка	11,2	15,2	17,1	16,3	14,0	12,2
Внутренняя обкатка	15,8	21,3	24,8	24,2	21,2	17,9

Уравнение, описывающее зависимость $q = f(c)$, имеет вид:

– при внешней обкатке:

$$q = -0,0007c^4 + 0,0119c^3 - 0,0702c^2 + 0,1614c - 0,0481; \quad (12)$$

– внутренней обкатке:

$$q = -0,0009c^4 + 0,0138c^3 - 0,0853c^2 + 0,2112c - 0,0721. \quad (13)$$

Для определения влияния степени заполнения барабанов a материалом и мелющими телами на эффективность измельчения были проведены исследования, при которых величина a изменялась от 30 до 80%. Результаты исследований (табл. 12) показали, что по мере роста величины a происходит сначала увеличение, а затем снижение эффективности процесса помола E . Максимальное значение параметра E было достигнуто при $a = 50\%$.

Уравнение, описывающее зависимость $E = f(a)$, имеет вид:

– при внешней обкатке:

$$E = -0,0007a^4 + 0,0119a^3 - 0,0702a^2 + 0,1614a - 0,0481; \quad (14)$$

– внутренней обкатке:

$$E = -0,0009a^4 + 0,0138a^3 - 0,0853a^2 + 0,2112a - 0,0727. \quad (15)$$

Таблица 12

Воздействие степени заполнения барабанов мелющими телами и материалом a на эффективность помола E

$E, \%$	$a, \%$					
	30	40	50	60	70	80
Внешняя обкатка	33,2	40,3	43,4	42,0	40,6	39,0
Внутренняя обкатка	47,6	58,4	64,5	62,7	60,7	58,3

Для изучения влияния диаметра мелющих тел на эффективность процесса измельчения были осуществлена серия помолов шарами диаметром от 5,5 до 18 мм. Результаты экспериментальных исследований, проведенных при внутренней обкатке барабанов, представлены в табл. 13. Выполнив анализ полученных данных аналогично тому, что реализовывался при рассмотрении водопадного режима, было установлено, что при центрифугальном режиме максимальная эффективность достигается, если $D_B / d_{III} \approx 5$, а соотношение размеров мелющих тел и частиц материала не менее, чем 2,5 : 1,0.

Таблица 13

Влияние диаметра шаров d_{III} и диаметра барабана D_B на эффективность помола E при центрифугальном режиме работы

$E, \%$	$d_{III}, \text{ мм}$			
	5,5	11,0	16,5	18,0
$D_B = 60 \text{ мм}$	33,3	43,5	42,8	39,8
$D_B = 80 \text{ мм}$	35,7	49,7	53,1	51,8
$D_B = 100 \text{ мм}$	40,4	58,8	63,8	64,5
$D_B = 120 \text{ мм}$	42,0	62,5	67,9	69,2

Более того, полученные результаты позволяют изучить влияние критерия b на эффективность процесса помола, т.к. при проведении исследований величина геометрического критерия k была неизменной, а измельчение материала осуществлялось в барабанах разных диаметров. На основании данных для внешней обкатки, представленных в табл. 13, и аналогичных опытов, выполненных для внутренней обкатки барабанов, было установлено влияние критерия b на эффективность помола (табл. 14).

Таблица 14

Зависимость эффективности помола E от геометрического критерия b при центрифугальном режиме работы

$E, \%$	b			
	0,6	0,8	1,0	1,2
Внешняя обкатка	32,2	38,7	45,2	49,4
Внутренняя обкатка	39,8	51,8	64,5	69,2

Из табл. 14 видно, что с повышением величины критерия b эффективность измельчения возрастает.

Следующий этап исследований заключался в изучении влияния геометрического критерия k на процесс помола. Полученные результаты показали, что увеличение численного значения параметра k обуславливает снижение эффективности измельчения как при внутренней (табл. 15), так и при внешней обкатке барабанов (табл. 16).

Таблица 15
Воздействие геометрического критерия k на эффективность помола E при внутренней обкатке и центрифугальном режиме

Параметр	k			
	0,2	0,25	0,294	0,333
$E, \%$	80,6	72,1	64,5	54,2

Таблица 16
Влияние геометрического критерия k на эффективность помола E при внешней обкатке и центрифугальном режиме

Параметр	k			
	0,333	0,5	0,714	1,0
$E, \%$	56,0	49,4	43,4	34,7

Дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния угловой скорости барабана и времени измельчения на процесс помола. При этом использовался базовый вариант мельницы с рациональными параметрами загрузки для центрифугального режима. В табл. 17 представлены результаты исследований влияния угловой скорости барабана ω на эффективность измельчения. Видно, что с увеличением ω линейно повышается эффективность помола E . Причем при внутренней обкатке барабанов ее значение выше, чем при внешней. Кроме того, следует отметить, что этот результат был получен за время измельчения в 10 раз меньше, чем при водопадном режиме. Все это свидетельствует о том, что помол материала в центрифугальном режиме является самым эффективным.

Таблица 17
Зависимость эффективности помола E от угловой скорости барабана ω при центрифугальном режиме работы

$E, \%$	$\omega, \text{ рад/с}$				
	100	120	140	160	180
Внешняя обкатка	12,6	19,7	27,6	35,5	43,4
Внутренняя обкатка	18,8	29,3	41,0	52,7	64,5

Уравнение, описывающее зависимость $E = f(\omega)$, имеет следующий вид:

– при внешней обкатке:

$$E = 0,387\omega - 26,42; \quad (16)$$

– внутренней обкатке:

$$E = 0,574\omega - 39,1. \quad (17)$$

Исследование влияния времени измельчения на эффективность помола проводилось на различных материалах: гипсовом камне (ГК), клинкере (К) и стеклобее (С). В табл. 18 представлены результаты опытов, выполненных при внутренней обкатке барабанов. Они показали, что с увеличением твердости материала эффективность измельчения снижается. В частности, около 64% от всего объема частиц гипсового камня достигает размера менее 100 мкм за время $t = 1$ мин, а 100% лишь после помола в течение $t = 4$ мин. В этой связи при реализации непрерывного цикла работы планетарной мельницы следует особое внимание уделить механизму выноса мелких частиц материала из барабанов, что позволит значительно повысить ее производительность.

Таблица 18
Взаимосвязь времени помола t и твердости материала с эффективностью E при центрифугальном режиме работы

$E, \%$	$t, \text{ мин}$				
	0,5	1	3	4	5
ГК (внутр. обкатка)	42,2	64,5	96,2	100	–
ГК (внеш. обкатка)	28,4	43,4	72,4	81,9	88,8
К (внутр. обкатка)	19,1	28,7	59,2	68,0	74,2
С (внутр. обкатка)	15,6	23,5	46,7	53,5	58,9

Уравнение, описывающее зависимость $E = f(t)$ для гипсового камня, имеет следующий вид:

– при внешней обкатке:

$$E = -0,306t^4 + 3,827t^3 - 18,187t^2 + 49,684t + 7,8584; \quad (18)$$

– внутренней обкатке:

$$E = -2,1143t^4 + 20,11t^3 - 69,75t^2 + 118t - 1,7429. \quad (19)$$

Основными параметрами, влияющими на намот (уменьшение веса) мелющих тел, являются скорость их движения, зависящая от частоты вращения барабанов, и абразивность частиц измельчаемого материала. Для исследования этих параметров было принято решение провести серию помолов таких материалов, как гипсовый камень (ГК) и кварцевый песок (КП). При этом величина угловой скорости ω изменялась от 22 до 180 рад/с. Для проведения исследований была принята планетарная мельница с внутренней обкаткой барабанов

и рациональными параметрами загрузки. Полученные результаты (табл. 19) позволяют говорить о линейном росте намол u при повышении угловой скорости барабанов и абразивности материала. В частности, при помоле гипсового камня величина u составляла от 0,73 до 1,14 кг/т. Для обычных шаровых мельниц значение u находится в диапазоне от 1,0 до 2,2 кг/т [4, с. 302].

Таблица 19

Влияние угловой скорости барабана ω на намол u

u , кг/т	ω , рад/с						
	22	60	100	120	140	160	180
КП	0,91	1,03	1,15	1,23	1,33	1,39	1,46
ГК	0,73	0,8	0,9	0,95	1,02	1,09	1,14

Для проведения исследований по определению влияния конструктивных параметров агрегата на энергозатраты процесса измельчения была принята базовая конфигурация планетарной мельницы с внутренней обкаткой барабанов, рациональными параметрами загрузки и угловой скоростью $\omega = 180$ рад/с. Для сравнения эффективности различных измельчителей обычно применяется такой параметр, как удельные энергозатраты $\mathcal{E}_{уд}$, представляющие собой отношение затраченной электроэнергии (кВт·ч) на помол одной тонны материала. Поэтому именно он и был использован для анализа полученных результатов. Они показали, что удельные энергозатраты $\mathcal{E}_{уд}$, в зависимости от конструктивных особенностей планетарной мельницы, могут изменяться в широких пределах. Кроме того, было установлено, что увеличение геометрического критерия k приводит к росту величины $\mathcal{E}_{уд}$ (табл. 20), а повышение b – к снижению $\mathcal{E}_{уд}$ (табл. 21).

Таблица 20

Зависимость удельных энергозатрат $\mathcal{E}_{уд}$ от геометрического критерия k

Параметр	k			
	0,2	0,25	0,294	0,333
$\mathcal{E}_{уд}$, кВт·ч/т	21,1	22,6	23,3	28,2

Таблица 21

Воздействие геометрического критерия b на удельные энергозатраты $\mathcal{E}_{уд}$

Параметр	b			
	0,6	0,8	1,0	1,2
$\mathcal{E}_{уд}$, кВт·ч/т	46,2	30	23,3	20,8

Эти результаты еще раз подтверждают тот факт, что при проектировании планетарных мельниц необходимо уделять особое внимание

подбору конструктивных параметров. В свою очередь, для минимизации энергетических затрат на проведение процесса помола в центрифугальном режиме необходимо, чтобы величина геометрического критерия k была равной или близкой 0,2, а $b \geq 1$. В этом случае удельные энергозатраты на процесс помола будут составлять около 20 кВт·ч/т. Для сравнения стоит отметить, что в обычной шаровой мельнице даже при непрерывном цикле работы затраты энергии на измельчение составляют 35–40 кВт·ч/т [7, с. 105]. Т.е. на основании полученных данных можно утверждать, что планетарные мельницы являются более экономичным помольным агрегатом, чем обычные шаровые.

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить рациональные конструктивные и технологические параметры горизонтальных планетарных мельниц, дать рекомендации по их проектированию и эффективной эксплуатации. Полученные результаты еще раз подтвердили преимущество данного типа помольных агрегатов по сравнению с обычными шаровыми.

Литература

1. Бушуев, Л. П. Об аналогии между движением массива частиц в шаровой и планетарной центробежной мельницах / Л. П. Бушуев // Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. – 1959. – № 4. – С. 153–155.
2. Ким, Б. Г. Относительное движение мелющих тел в барабане планетарной мельницы при водопадном режиме ее работы / Б. Г. Ким // Изв. вузов. Горный журнал. – 1975. – № 9. – С. 81–86.
3. Ким, Б. Г. Определение положения помольной среды в планетарной мельнице при каскадном режиме / Б. Г. Ким // Изв. вузов. Горный журнал. – 1976. – № 1. – С. 149–153.
4. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
5. Ходаков, Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г. С. Ходаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 238 с.
6. Батунер, Л. М. Математические методы в химической технике / Л. М. Батунер, М. Е. Позин. – Л.: Химия, 1971. – 823 с.
7. Бауман, В. А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В. А. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. – М.: Машиностроение, 1981. – 324 с.

Поступила 28.02.2011