

УДК 621.926.5

А. Н. ИВАНОВ, д-р техн. наук, проф.

Харьковский государственный университет строительства и архитектуры, г. Харьков

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ ТРУБНЫХ МЕЛЬНИЦ

*На принципе соответствия размеров частиц и прикладываемой к ним энергии для измельчения разработан энергосберегающий режим работы шаровой загрузки для первых камер трубных цементных мельниц. Предложены варианты реализации нового режима при помоле клинкера и добавок*

*На принципі відповідності розмірів часток енергії, що прикладається до них, для здрібнювання розроблено енергосберігаючий режим роботи кульового завантаження для перших камер трубних цементних млинів. Запропоновані варіанти реалізації нового режиму при помолі клінкеру та добавок.*

### Введение

Измельчение материалов является одним из наиболее широко распространённых и энергоёмких процессов в различных отраслях промышленности: производстве строительных материалов и керамики, горнообогатительной, химической, энергетической и др. Основными помольными агрегатами, несмотря на их низкий КПД, по-прежнему остаются шаровые и трубные мельницы благодаря их высокой производительности. Так, только на помол 1 т шлакопортландцемента марки 400 расходуется порядка 40 кВт·ч электроэнергии, а марки 700–800 до 80 кВт·ч. Учитывая громадные масштабы переработки (сотни миллионов тонн различных материалов) увеличение производительности таких мельниц даже на 3–4 % даёт значительный экономический эффект.

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность работы шаровых мельниц является режим работы их шаровой загрузки. Известно, что между режимом работы мелющей загрузки и размером частиц материала есть определенная взаимосвязь. Сейчас применяют способ помола в трубных мельницах, когда на разных участках их длины создают разные режимы работы мелющей загрузки: в начале мельницы – водопадный режим для измельчения больших частиц ударом, в середине – смешанный водопадно-каскадный режим и в конце – каскадный режим для измельчения мелких частиц истиранием.

Недостаток здесь в том, что режим работы мелющих тел меняют по длине мельницы, а в каждом поперечном сечении режим остается постоянным неизменным за каждый оборот мельницы. Это снижает эффективность её работы, потому что в каждом поперечном сечении мельницы всегда находятся разные по размерам фракции частиц (и больших и мелких), что требует соответственно и своих режимов измельчения.

Автором был разработан пульсирующий способ измельчения материалов в трубной мельнице, по которому водопадный и каскадный режимы работы мелющих тел меняют за один оборот с одинаковыми интервалами времени, равными  $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{6}$  времени одного оборота мельницы. Такой пульсирующий режим работы уменьшает размеры “мертвой зоны” от поперечной сегрегации шаров и материала и повышает эффективность помола.

Недостаток этого способа в том, что он, в основном, направлен на разрушение “мертвой зоны” мелющей загрузки и не создает оптимального соответствия между размером частиц и режимом их измельчения в каждом поперечном сечении по длине мельницы, нет рекомендаций о порядке изменения режимов в каждом поперечном сечении вдоль мельницы.

**Цель данной работы** – устранение указанных недостатков.

### Основная часть

Известно, что наиболее рациональным есть избирательное (селективное) измельчение материалов. В этом случае частицы разных размеров должны измельчаться мелющими телами, которые имеют энергию, достаточную для разрушения частиц определенного

размера. Если энергия мелющих тел будет большей, то наблюдается ее перерасход и переизмельчение материала, если же энергия будет меньшей, то материал будет неподготовленный под дальнейшее истирание его цельпесом. Есть предельный размер частиц материала, измельчение которых ударом неэффективно.

В связи с тем, что в каждом поперечном сечении мельницы по её длине есть и большие и мелкие частицы, то необходимо, чтобы и мелющие тела работали за период каждого оборота то в водопадном, то в каскадном режимах пропорционально количеству частиц, которые требуют измельчения ударом и истиранием. Соотношение количеств этих частиц можно определить из диаграммы помола, построенной по остаткам на ситах, размер которых отвечает предельному размеру частиц, требующих измельчения истиранием. Тогда ординаты под и над диаграммой помола покажут количество соответственно больших и мелких частиц.

Остается только определить этот предельный размер частиц, который нецелесообразно измельчать ударом ( то есть в водопадном режиме), а необходимо измельчать истиранием в каскадном режиме. Этот размер можно определить экспериментально. Таким образом, водопадный и каскадный режимы работы надо менять между собой с интервалами времени за период одного оборота в любом поперечном сечении мельницы по её длине как

$$\frac{T_B}{T_K} = \frac{R}{R_0 - R} \quad (1)$$

где  $T_B$  и  $T_K$  – время работы мелющих тел в пределах одного оборота корпуса мельницы соответственно в водопадном и каскадном режимах в любом искомом поперечном сечении по длине мельницы;

$R_0$  и  $R$  – весовые остатки материала согласно началу измельчения и в любом искомом поперечном сечении по длине мельницы на сите, размер отверстий которого отвечает размеру частиц, нуждающихся уже в измельчении истиранием, а не ударом, что отвечает 50 % прохода частиц измельчаемого материала через сито 008, так для клинкера этот предельный размер равняется 0,5 мм.

Значение  $R$  согласно Розина - Раммлера можно найти как

$$R = R_0 e^{-kL^m}, \quad (2)$$

где  $L$  – текущая длина мельницы;

$k$  и  $m$  – постоянные для данного материала и мельницы коэффициенты.

Такое изменение режимов создает новый пульсирующий режим, реализация которого решается за счет чередования футеровочных плит с высоким и низким коэффициентом сцепления по отношению к мелющей загрузке [1]. Известно, что для создания водопадного режима работы с целью измельчения больших частиц ударом в первых камерах трубных мельниц устанавливают футеровочные плиты с высокими коэффициентами сцепления, то есть профиль рабочей поверхности которых имеет выступы разной формы (волнистые, ступенчатые, гребенчатые, кулачковые и т. д.). Во вторых камерах для создания каскадного режима с целью тонкого измельчения материала применяют плиты с низким (минимальным) коэффициентом сцепления, которые дадут максимальное скольжение загрузки: это гладкие цилиндрические плиты. Таким образом, если по длине окружности барабана установить с определенным чередованием расчетное количество плит с высоким и низким коэффициентом сцепления, то за один оборот барабана шары будут работать часть оборота в водопадном ( при контакте с участком плит с высоким коэффициентом сцепления) и часть оборота в каскадном режиме ( при контакте с участком плит с низким коэффициентом сцепления). Используя прежние обозначения, имеем

$$T_B / T_K = \ell_B / \ell_H = \gamma / \theta = H_i / h_i = \frac{e^{-kL^m}}{1 - e^{-kL^m}}, \quad (3)$$

где  $\ell_B, \gamma, \ell_H, \theta$  – соответственно длины и углы секторов участков плит с высоким и низким коэффициентом сцепления;

$H_i$  и  $h_i$  – ординаты соответственно под и над диаграммой помола, то есть соответственно процентный весовой остаток и проход на контрольном сите в местах отбора контрольных проб.

Из диаграммы помола любой трубной мельницы, построенной по остаткам на сите граничного размера, видно как количество больших частиц по длине мельницы, которые требуют водопадного режима измельчения, уменьшается. Таким же образом, должен уменьшаться и водопадный режим. Режим работы, в основном, зависит от угла отрыва мелющих тел от футеровки, который практически находится в диапазоне от  $35^{\circ}$  до  $65^{\circ}$  (при отсчета угла от верхней точки вертикали – диаметра) и соответствует диапазону коэффициента сцепления футеровки с загрузкой 0.6-0.3 [2]. Поэтому текущий угол подъема мелющей загрузки  $\beta$  при отсчета его от нижней точки вертикали – диаметра корпуса мельницы надо изменять как

$$\beta = 145^{\circ} \cdot e^{-kL^m} \tag{4}$$

до его минимального значения  $\beta_{min}=115^{\circ}$  в конце мельницы за счет изменения вдоль мельницы коэффициента сцепления мелющей загрузки  $k_c$  с футеровкой как

$$k_c = 0,6 \cdot e^{-kL^m} \tag{5}$$

до его минимального значения  $k_{c\ min}=0,3$  в конце мельницы.

Обычно на цемзаводах тонкость помола контролируют по остаткам на сите 0088. Для перерасчета на сито 05 автором предложена такая зависимость

$$R_{0,5}=100 \left( \frac{R_{0,088}}{100} \right)^{\left( \frac{0,5}{0,088} \right)^{0,86}} = 100 \left( \frac{R_{0088}}{100} \right)^{4,455}, \quad \% \tag{6}$$

На рис. 1 схематично показана диаграмма помола клинкера, которая построена по остаткам R на сите 0.5 мм, где по оси абсцисс отложена длина мельницы L, а по оси ординат отложены такие параметры как:

R – весовые остатки в % в пробе материала на сите 05 ;

$\alpha$  – угол подъема в градусах мелющей загрузки при отсчете его от нижней точки вертикали-диаметра корпуса мельницы;

$k_c$  – коэффициент сцепления мелющей загрузки с футеровкой.

Для конкретного использования этой диаграммы заменим ординату R, % на ординату угла подъема  $\beta$  мелющих тел. Угол подъема  $\beta$  зависит от коэффициента частоты вращения  $\psi$ , степени заполнения корпуса загрузкой  $\varphi$  и профиля футеровки, который определяется коэффициентом сцепления  $K_c$ . При принятых на заводах средних значениях  $\psi = 0,67-0,75$ ,  $\varphi = 0,25-0,35$  рабочий диапазон угла отрыва составляет от  $35^{\circ}$  (водопадный режим) до  $65^{\circ}$  (каскадный). Величина  $K_c$  меняется от 0,6 (чисто водопадный режим) до 0,3 (чисто каскадный). При  $K_c = 0,5$  наблюдается смешанный водопадно-каскадный режим.

Известна методика Воробьева Н. Д. для расчетов  $K_c$  для любых профилей футеровок. Так  $K_c = 0,463$  обеспечивает угол отрыва в  $49^{\circ}$ , при  $K_c = 0,386$  угол отрыва  $52^{\circ}$  при  $K_c = 0,311$  имеем  $56^{\circ}$  и т. д. Поэтому на диаграмме помола ординату  $35^{\circ}-65^{\circ}$  (соответствующую  $\beta = 145^{\circ}-115^{\circ}$ ) удобнее заменить на ординату  $K_c$  (0,6–0,3).

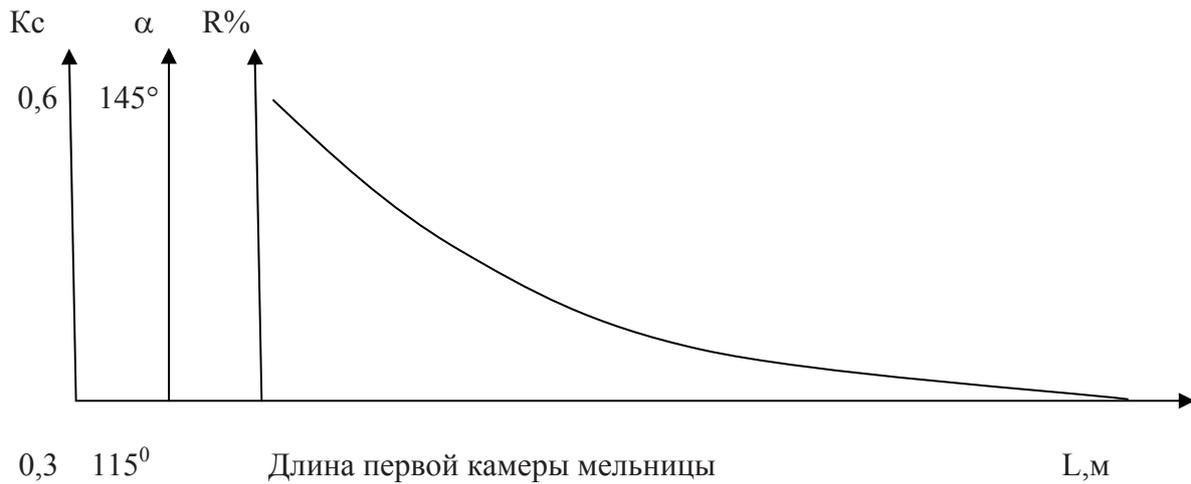


Рис. 1. Комплексная расчетная диаграмма помола

Итак, для реализации принципа избирательного измельчения необходимо по мере уменьшения частиц от измельчения при продвижении их вдоль мельницы соответственно диаграмме помола или по вышеприведенным формулам уменьшать водопадный режим и пропорционально увеличивать каскадный. Добиться такого нового энергоадаптированного режима можно разными средствами, например, конической формой корпуса первой камеры мельницы, а в обычных трубных мельницах это можно сделать за счет изменения профиля футеровки, от которого зависит  $K_c$ , но это ступенчатый вариант в отличие от бесступенчатого в случае конического корпуса первой камеры трубной мельницы.

Энергоадаптированный режим работы можно реализовать и в мельницах периодического действия, в которых изменение угла подъема меняется в зависимости от времени работы  $t$ , а не по длине мельницы. Для этого рабочую частоту вращения мельницы надо менять относительно критической как

$$n_p = \sqrt{-\cos 145^\circ \cdot e^{-k \cdot t^m}} \cdot n_{кр} \quad (7)$$

Автором обоснована целесообразность применения конического корпуса первой камеры трубной мельницы с целью реализации энергоадаптированного режима работы. Конические мельницы, в сравнении с барабанными, имеют следующие преимущества: плавное изменение энергии мелющих тел по длине мельницы в зависимости от уменьшающихся размеров частиц материала, который измельчается, и четкую классификацию мелющих тел (МТ) по длине мельницы.

Для расчетов основных параметров любой шаровой мельницы надо знать степень её заполнения загрузкам  $\varphi$ . Для конической мельницы этот параметр не постоянный, а меняется по длине мельницы как

$$\varphi_i = \frac{\alpha_i}{360} - \frac{\sin \alpha_i}{2\pi} \quad (8)$$

Потому что форму сегмента загрузки имеет только при каскадном режиме мельницы, то текущий угол сегмента  $\alpha_i$  для конуса с углом  $\beta$  надо определять при отсчета  $l_i$  от минимального радиуса конуса  $R_{\min}$  с конечным углом сегмент  $\alpha_k$  у дна по формуле

$$\alpha_i = 2 \cdot \arccos \left[ \frac{R_{\min} \left( 1 + \cos \frac{\alpha_k}{2} \right) + l_i \cdot \operatorname{tg} \beta}{R_{\min} + l_i \cdot \operatorname{tg} \beta} - 1 \right] \quad (9)$$

НИИЦемент на основе опыта эксплуатации трубных мельниц составлена таблица с

оптимальными значениями для мельниц разных диаметров основных параметров режимов работы МТ-степень заполнения и частота вращения корпуса. Автор предлагает всё это реализовать в одной трубной мельнице, первая камера которой выполнена конической.

Такая коническая мельница позволяет плавно менять скоростной режим и степень заполнения в любом сечении по длине первой камеры мельницы пропорционально убывающим размерам частиц материала, который измельчается. Задача состоит в определении такого угла конусности, который обеспечит оптимальные параметры согласно таблице НИИЦемент для цилиндрических мельниц. Для этого коническая мельница разбивается по длине первой камеры мельницы на ряд сечений, соответствующих типоразмерам таблицы НИИЦемент, где даны типичные барабанные мельницы 4 x 13,5 м; 3,2 x 15 м; 3 x 14 м; 2,6 x 13 м. Необходимо выбрать такой угол наклона, чтобы в сечениях диаметров 3,2 м; 3 м; 2,6 м на соответствующих участках по длине мельницы значения степени заполнения и скоростных режимов отвечали оптимальным значениям таблицы НИИЦемент.

По ранее полученным зависимостям для вычисления степени заполнения (9) можно определить угол конусности  $\beta$ , как

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{R_{\max} \left(1 + \frac{\cos \alpha_H}{2}\right) - 1 - \cos \frac{\alpha_i}{2} R_{\max}}{li}, \quad (10)$$

где  $R_{\max}$  – максимальный радиус конуса корпуса мельницы;

$\alpha_H$  и  $\alpha_i$  – соответственно угол сегмента загрузки в начальном и рассматриваемом сечениях по длине мельницы;

$li$  – длина мельницы в рассмотренном сечении.

Значения  $\alpha_H$  и  $\alpha_i$  определяем по графику через оптимальные  $\varphi$ , взятые с таблицы НИИЦемент. Итак, задаваясь начальной и конечной степенью заполнения можно определить угол конуса.

В связи с тем, что в коническом корпусе по его длине реализуются разные скоростные режимы, но рабочая частота вращения  $n_p$  остается постоянной для всего корпуса как в начальном сечении (индекс  $n$ ), так и в другом любом рассмотренном сечении (индекс  $i$ ) то скоростной коэффициент будет уменьшаться по длине мельницы соответственно  $\sqrt{D_i}$ . Таким образом, правильным выбором угла конуса корпуса мельницы  $\beta$  можно плавно осуществлять оптимальные параметры работы мелющей загрузки, (степень заполнения, скоростной и соответственно энергетический режимы), что повышает эффективность процесса измельчения.

Так как режим работы мелющих тел определяется коэффициентом  $\psi = \sqrt{\cos \alpha_{\text{omp}}}$  то, подставляя предельные значения  $\alpha_{\text{omp}} = 35^\circ$  и  $65^\circ$ , получаем предельные значения водопадного режима:

$$\psi_H = \sqrt{\cos 35} = 0,765,$$

$$\psi_K = \sqrt{\cos 65} = 0,65.$$

Имея предельные значения  $\psi$ , можно определить и связь предельных диаметров конуса: начального  $D_H$  и конечного  $D_K$ . После преобразований

$$D_K = \left(\frac{\psi_K}{\psi_H}\right)^2 D_H = \left(\frac{0,65}{0,765}\right)^2 D_H = 0,69 \cdot D_H.$$

В конических мельницах можно непрерывным образом реализовать и разработанный

автором новый энергоадаптированный режим работы мелющих тел.

Для реализации энергоадаптированного режима необходимо найти зависимость угла подъема шаров от угла конусности корпуса мельницы. Ее находим из следующего условия: так как корпус мельницы жесткий, то рабочая частота вращения его во всех сечениях по длине корпуса будет постоянной и одинаковой, но критическая частота вращения  $n_{кр}$  конического корпуса с начальным радиусом  $R$  будет меняться в связи с изменением радиуса  $R_i$  вдоль корпуса. Так как рабочая частота вращения корпуса  $n_p = \psi n_{кр} = const$ , то с изменением  $n_{кр}$  должен соответственно изменяться и скоростной коэффициент  $\psi$ . Подставляя  $n_{кр}$ , получаем связь этих величин для начального сечения корпуса ( $\psi_H n_{крH}$ ) и любого рассматриваемого по длине конуса ( $\psi_u n_{крi}$ )

$$\psi_u = \psi_H \frac{\sqrt{R_i}}{\sqrt{R_H}} \quad (11)$$

Учитывая, что  $\psi = \sqrt{\cos \gamma_0}$  уравнение (11) принимает такой вид

$$\cos \gamma_{0u} = \cos \gamma_{0H} \frac{R_i}{R_H} \quad (12)$$

После преобразований

$$R_H - li \operatorname{tg} \alpha_k = \frac{R_H \cos \gamma_{0i}}{\cos \gamma_{0H}} \quad (13)$$

где  $\alpha_k$  – угол конуса корпуса.

$\gamma_0$  – угол отрыва шаров от футеровки, при отсчёте от вертикали – диаметра.

Выше было показано, что энергоадаптированный режим работы осуществляется при уменьшении угла подъема шаров  $\beta_i$  вдоль корпуса от  $145^\circ$  ( $180^\circ - 35^\circ$ ) до  $115^\circ$  ( $180^\circ - 65^\circ$ ) как

$$\beta_i = 145^\circ e^{-kl^m} \quad (14)$$

Угол отрыва  $\gamma_{0i} = 180^\circ - \beta_i$ . Соответственно

$$\cos \gamma_{0i} = \cos (180^\circ - \beta_i) = -\cos 145^\circ e^{-kl^m} \quad (15)$$

Величина  $\cos \gamma_{0H}$  будет постоянной для заданных начальных условий и в нашем случае равняться

$$\cos \gamma_{0H} = \cos (180^\circ - 145^\circ) = \cos 35^\circ = 0,819 \quad (16)$$

После преобразований (13) получаем

$$\alpha_k = \operatorname{arcctg} \frac{R_H \cos \gamma_{0H} - R_H \cos \beta_i}{l_i \cos \gamma_{0H}},$$

а с учетом (16)

$$\alpha_k = \operatorname{arcctg} \frac{0,819 R_H - R_H \cos \beta_i}{0,819 l_i} \quad (17)$$

Величина  $li$  изменяется с любым удобным для исследователя шагом от 0 до размера длины первой шаровой камеры, значение угла подъема шаров  $\beta_i$  удобнее брать из графика, чем находить через формулу (15). График угла подъема  $\beta_i$  строят в зависимости от длины участка  $li$  и из него по принятым  $li$  находят искомые значения  $\beta_i$  (рис. 2). Для этого используют диаграмму помола клинкера. Обычно в цементной промышленности диаграмму

помола строят по остаткам на сите 008. Поскольку энергоадаптированный режим работы рассчитывается на основе диаграммы помола, построенной по остаткам на сите 05, то необходимо выполнять соответствующий перерасчет по предложенному автором уравнению (6).

Через  $\beta_i$  по (15) находим углы отрыва  $\gamma_{0i}$  на разных участках по длине мельницы и по (17) определяем угол конусности для этих участков. При расчётах конический корпус 1-ой камеры мельницы может состояться из участков с разными углами конусности. С целью повышения технологичности изготовления корпуса принимаем один угол конусности, равный среднему арифметическому значению углов. Расчеты показывают, что в зависимости от характера диаграммы помола угол конусности лежит в диапазоне от  $7^\circ$  до  $14^\circ$ .

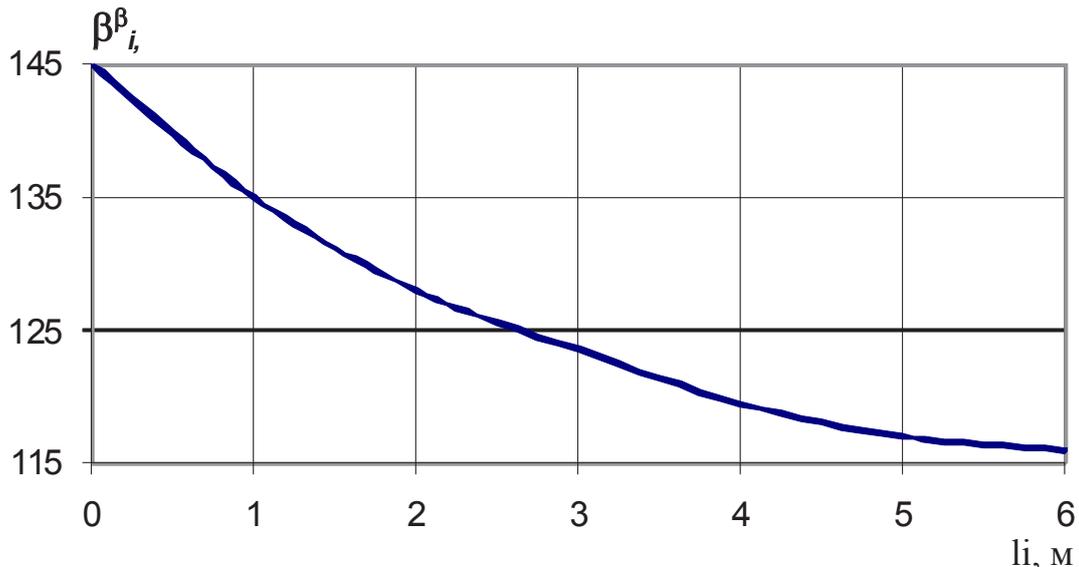


Рис.2. Зависимость угла подъема шаров  $\beta_i$  по длине первой камеры

Одним из недостатков конических мельниц являются вопросы футеровки конического корпуса. С целью ликвидации этого недостатка автором разработана специальная конструкция бронеплит. Суть предложения заключается в том, что количество футеровочных плит в соседних кольцах по длине мельницы должна отличаться на целое число плит.

Аналитически это запишем в таком виде:  $\pi D - \pi d = l \cdot n$ .

После преобразований с учетом взаимосвязи диаметров получаем:

$$l = \frac{\pi \cdot 2L \cdot \operatorname{tg} \beta}{K \cdot n}, \quad (18)$$

где  $l$  – длина дуги большего торца плиты;  
 $K$  – количество колец;  
 $n$  – разность в количестве плит в соседних кольцах.  
 $L$  – осевая длина корпуса.

### Выводы

На принципе соответствия размеров частиц и прикладываемой к ним энергии для измельчения разработан энергосберегающий режим работы шаровой загрузки для первых камер трубных цементных мельниц. Предложены варианты реализации нового режима при помоле клинкера и добавок.

С целью ликвидации пере- или недоизмельчения клинкера и добавок необходимо, чтобы энергия на измельчение частиц (определяемая углом подъема шаров) строго соответствовала

прочности частиц, которая изменяется по мере уменьшения размера частиц в результате их измельчения вдоль первой камеры трубной мельницы. Такую зависимость графически представляет диаграмма помола, где по оси абсцисс отложена длина мельницы, а по трём осям ординат: весовые остатки  $R_n$  в пробе материала на сите 05; угол подъема в градусах мелющей загрузки при отсчёте его от нижней точки вертикали-диаметра корпуса мельницы; коэффициент сцепления мелющей загрузки с футеровкой.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на поиск новых решений по реализации в ТМ идеальной «поршневой» структуры движения потока измельчаемого материала в режиме полного вытеснения, что будет значительно менее энергозатратным, чем замкнутый цикл помола.

#### Список литературы

1. Иванов А. Н. Энергоадаптированный режим работы ШБМ и его реализация. // Вісник НТУ «ХПІ». Хімія, хімічна технологія та екологія – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – Вып.17. – С. 123–128.
2. Иванов А. Н. Использование футеровки БРОПЭКС для реализации энергоадаптированного режима работы ШБМ // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2004, № 1. – С. 14–18.

### ENERGY- SAVING MODE OF BALL LOAD OF THE TUBE MILLS

A. N. IVANOV, Dr. Scie. Tech., Pf.

*On the principle that the particle sizes and applied to the power it is designed for crushing energy saving mode of ball load for the first camera tube cement mills. Proposed options for implementing the new regime for grinding clinker and additives.*

Поступила в редакцию 19.05 2011 г.