

УДК 621.926

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФУТЕРОВКИ ТРУБНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Кандидаты техн. наук Н.Д. Балера, канд. техн. наук Н.Г. Емельяненко,  
В.В. Горголюк, асп. П.А. Хахалев

### УДОСКОНАЛЕННЯ ФУТЕРОВКИ ТРУБНОГО КУЛЬОВОГО МЛИНА

Канд. техн. наук М.Д. Балера, канд. техн. наук М.Г. Ємельяненко,  
В.В. Горголюк, асп. П.А. Хахалев

### IMPROVEMENT OF THE LINING TUBE BALL MILL

Cand. of techn. sciences N. Balera, cand. of techn. sciences N. Emelianenko,  
V. Gorgolyuk, Postgraduate P. Nahalev

*Дано обоснование эффективности применения волнисто-угловой футеровки для трубной шаровой мельницы на основании моделирования движения мелющих тел. Получены зависимости кинетической, потенциальной и общей энергии мелющих тел от высоты футеровки при различной частоте вращения барабана. Выявлены диапазоны рациональных параметров (частоты вращения барабана и высоты волны футеровки), при которых эффективно применение волнисто-угловой футеровки барабана трубной шаровой мельницы.*

**Ключевые слова:** трубные шаровые мельницы, мелющие тела, футеровка.

*Наведено обґрунтування ефективності використання хвилясто-кутової футеровки трубного кульового млина на основі моделювання руху тіл для помелу клінкеру. Одержано залежності кінетичної, потенційної та загальної енергії тіл для помелу від висоти футеровки при різних частотах обертання барабану. Знайдено діапазони раціональних параметрів (частоти обертання барабана та висоти хвилі футеровки), при яких використання хвилясто-кутової футеровки є ефективним.*

**Ключові слова:** трубні кульові млини, мелючі тіла, футеровка.

*The ground of efficiency of application of wavy angular lining-up is given for a pipe ball mill on the basis of design of motion grinding a tel. The calculations conducted in the programmatic package of EDEM substantially reduce costs at planning of equipment, as all experimental tests of machine are conducted through a computer design. The programmatic package of EDEM is based on the method of discrete element – numeral method for the calculation of motion of large number of particles that is generalization of method of eventual elements. The article contains the result of design of motion of grindings bodies in a mill of 2,6 x 1,0 m with the wavy-angular lining-up of*

*drum. Dependences of kinetic, potential and general energy of drinking bodies are got on the height of lining-up at different frequency of rotation of drum. With the increase of frequency of rotation of drum from 0,7 to 0,8 her critical value kinetic energy of drinking bodies at any height of wave of lining-up increases, and potential energy gas down.*

**Keywords:** pipe ball mills, grindings bodies, lining-up.

**Введение.** Статья относится к исследованиям, направленным на совершенствование конструкций и методик расчёта цементных трубных шаровых мельниц (ТШМ). В ТШМ во всем мире измельчается до 90% клинкера, на что тратится 8% мирового потребления энергии. Внутримельничные устройства позволяют повысить эффективность шаровых трубных мельниц [1, 2]. Важную роль среди внутримельничных устройств занимает футеровка, которая способна обеспечить рациональный режим работы мелющих тел. Об актуальности вопроса совершенствования футеровки говорит факт наличия более 150 видов футеровки.

**Анализ последних исследований и публикаций.**

На сегодняшний день особенно остро стоят вопросы энергетической эффективности производства, в том числе с использованием ТШМ [3-4]. Все больше внимания уделяется моделям футеровок, которые способны обеспечить рациональный (скоростной) режим работы мелющих тел [3-6]. Геометрические и прочностные характеристики футеровки влияют на количество потребляемой энергии при измельчении, расход мелющих тел и периодичность техобслуживания [5-6]. Поэтому важно подобрать рациональные параметры плит, позволяющие достигнуть требуемой эффективности измельчения и заданного качества цемента, при этом уменьшив износ оборудования.

Износ футерующих плит зависит от их геометрических параметров и влияет на технико-эксплуатационные характеристики мельницы. Исследователи и практики, в том числе дальнего зарубежья [7-9], постоянно совершенствуют методы исследования и конструкции футеровки ТШМ.

Наиболее распространенными конструктивными формами плит для футеровки цилиндрической части барабана шаровых мельниц являются ступенчатые и волнистые.

Для определения оптимальных геометрических параметров футеровки многими фирмами используется программный комплекс EDEM [10], который базируется на методе дискретных элементов – численном методе для расчета движения большого числа частиц. Полное моделирование движения мелющих тел с учетом их массовых характеристик позволяет подобрать наилучшие геометрические параметры футеровки и рациональный режим работы мельницы.

**Целью** исследования является научное обоснование эффективности применения волнисто-угловой футеровки барабана ТШМ.

**Основная часть исследования.** Работа содержит результаты моделирования движения мелющих тел в мельнице 2,6x1,0 м с волнисто-угловой футеровкой барабана при следующих исходных данных:

- *основные:* диаметр мельницы  $D = 2,6$  м; длина мельницы  $L = 1,0$  м; диаметр шара  $d_{ш} = 80$  мм = 0,08 м;

- *дополнительные:* критическая частота вращения  $n_{кр} = 26,97$  мин<sup>-1</sup>; рабочая частота вращения мельницы  $n = 20,50$  мин<sup>-1</sup>; масса мелющих тел – 6264 кг.

На первом этапе численного эксперимента проведен расчет параметров движения шаровой загрузки мельницы, футерованной волнисто-угловыми бронеплитами при частоте вращения барабана:  $0,7n_{кр}$ ;  $0,76n_{кр}$ ;  $0,8n_{кр}$ . Геометрические параметры таких плит соответствуют параметрам футеровки, используемой в первой камере измельчения ТШМ 2,6x13 м (рис. 1 а).

Следующим этапом моделирования движения мелющих тел с учетом их массовых характеристик было увеличение

высоты волны футеровки (рис. 1 б) на  $0,1 d_{ш}$ ;  $0,2 d_{ш}$  и расчет составляющих энергии мелющих тел при различной частоте

вращения:  $0,7 n_{кр}$ ;  $0,76 n_{кр}$ ;  $0,8 n_{кр}$  ( $18,88 \text{ мин}^{-1}$ ;  $20,50 \text{ мин}^{-1}$ ;  $21,58 \text{ мин}^{-1}$ ).

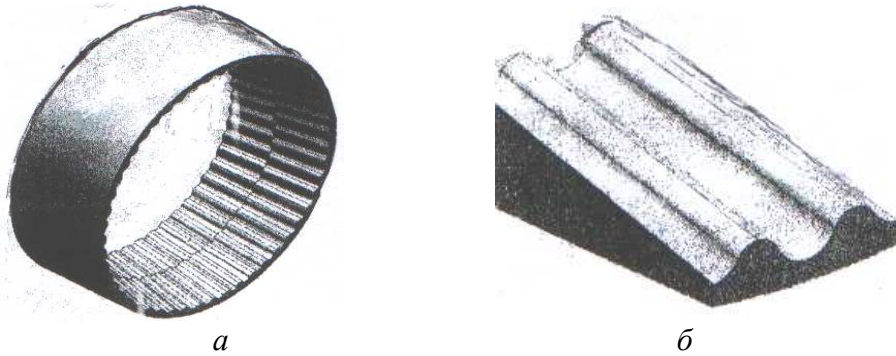


Рис. 1 – Волнисто-угловая футеровка барабана трубной мельницы

Путем моделирования движения мелющих тел внутри барабана с волнисто-угловой футеровкой получены следующие результаты (табл.1 и рис.2).

Из табл. 1 и рис. 2а видно, что с увеличением частоты вращения барабана от  $0,7n_{кр}$  до  $0,8n_{кр}$  кинетическая энергия  $E_k$  мелющих тел при любой высоте волны футеровки возрастает. Очевидно, что

изменение кинетической энергии мелющих тел пропорционально квадрату отношений частот вращения барабана (сравнить значения в скобках столбца 1 табл. 1 и столбцов 2, 5 и 8):

$$\left( \frac{E_{Ki}}{E_{K1}} \right) = f \left\{ \left( \frac{n_i}{n_1} \right)^2 \right\}$$

Таблица 1

Изменение кинетической ( $E_k$ ), потенциальной ( $E_{п}$ ) и общей ( $E$ ) энергии мелющих тел, Дж

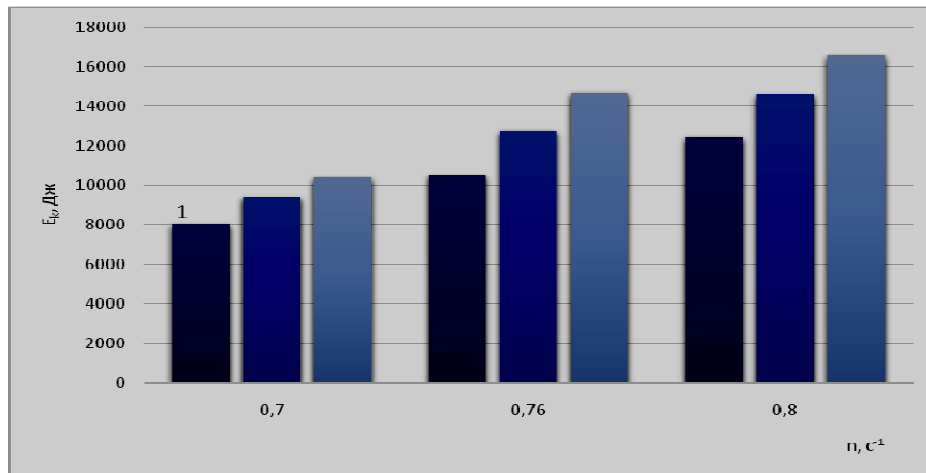
Частота вращения $n_i$ , $\left[ \left( \frac{n_i}{n_1} \right)^2 \right]$	Высота волны футеровки								
	$h_{исх}$ (1)			$h_{исх}+0,1d_{ш}$ (2)			$h_{исх}+0,2d_{ш}$ (3)		
	$E_{Ki}$ $\left( \frac{E_{Ki}}{E_{K1}} \right)$	$E_{Pi}$ $\left( \frac{E_{Pi}}{E_{P1}} \right)$	$E_i$ $\left( \frac{E_i}{E_1} \right)$	$E_{Ki}$ $\left( \frac{E_{Ki}}{E_{K1}} \right)$	$E_{Pi}$ $\left( \frac{E_{Pi}}{E_{P1}} \right)$	$E_i$ $\left( \frac{E_i}{E_1} \right)$	$E_{Ki}$ $\left( \frac{E_{Ki}}{E_{K1}} \right)$	$E_{Pi}$ $\left( \frac{E_{Pi}}{E_{P1}} \right)$	$E_i$ $\left( \frac{E_i}{E_1} \right)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n_1=0,7n_{кр}$ [1,00]	8033 (1,00)	27600 (1,00)	35633 (1,00)	10910 (1,00)	24430 (1,00)	35340 (1,00)	12430 (1,00)	22635 (1,00)	35065 (1,00)
$n_2=0,76n_{кр}$ [1,18]	9480 (1,18)	26200 (0,95)	35680 (1,00)	12734 (1,17)	22650 (0,93)	35384 (1,00)	14634 (1,18)	20510 (0,91)	35144 (1,00)
$n_3=0,8n_{кр}$ [1,30]	10400 (1,29)	25520 (0,92)	35920 (1,01)	14714 (1,35)	20860 (0,85)	35574 (1,01)	16575 (1,33)	18742 (0,83)	35317 (1,01)

С увеличением высоты волны футеровки на  $0,1d_{ш}$  кинетическая энергия  $E_k$  при частоте вращения  $n=0,7n_{кр}$  возрастает на 29% от исходного значения и при  $n=0,8n_{кр}$  – на 41%. При следующем увеличении высоты волны футеровки (на  $0,2d_{ш}$ )  $E_k$  при  $n=0,7n_{кр}$  возрастает на 14% и при  $n=0,8n_{кр}$  – на 13%, т. е. существенное увеличение высоты волны

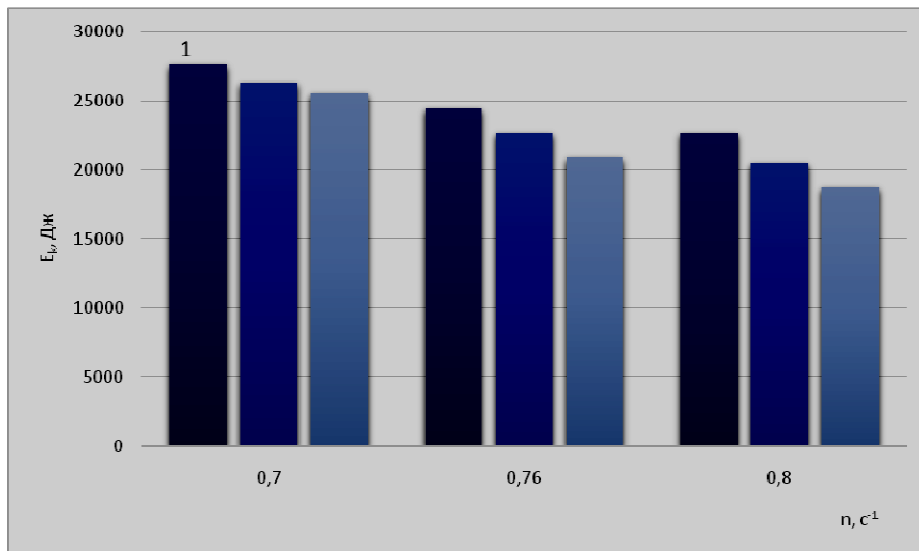
футеровки не позволяет заметно увеличить кинетическую энергию мелющих тел.

Из табл. 1 и рис. 2б следует, что увеличение частоты вращения барабана от  $0,7n_{кр}$  до  $0,8n_{кр}$  приводит к снижению потенциальной энергии  $E_{п}$  мелющих тел при любой высоте волны. При этом максимальному значению  $E_{п}$  соответствует исходная (минимальная) высота волны

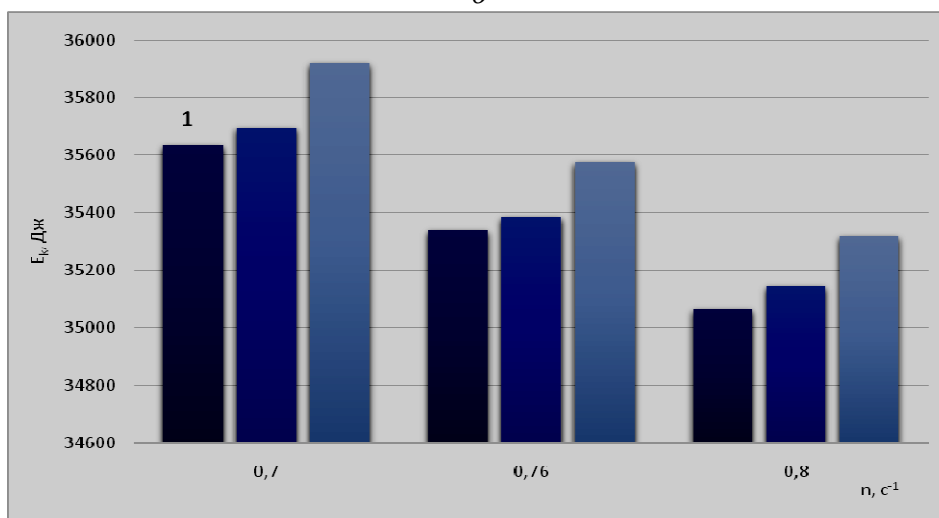
футеровки. Для исследуемого диапазона параметров мельницы и футеровки общая энергия измельчения достигнет своего максимума при частоте вращения барабана  $0,8n_{кр}$  и при исходной высоте волны футеровки.



*a*



*б*



*в*

Рис. 2 – Зависимость кинетической (*a*), потенциальной (*б*) и общей (*в*) энергии мелющих тел от изменения высоты футеровки при различной частоте вращения барабана

### Выводы:

1. Моделирование движения мелющих тел в мельнице с волнисто-угловой футеровки позволило получить зависимости кинетической, потенциальной и общей энергии мелющих тел от изменения высоты футеровки при различной частоте вращения барабана.

2. Результаты исследования выявили диапазоны параметров (частоты вращения барабана и высоты волны футеровки), при которых эффективно применение волнисто-угловой футеровки барабана трубной шаровой мельницы.

### Список использованных источников

1. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций [Текст] / М.Я. Сапожников. – М.: «Высш. школа», 1971. – 382 с.
2. Пироцкий В.З. Цементные мельницы: технологическая оптимизация [Текст] / В.З. Пироцкий. – СПб. – Изд-во ЦПО Информатизация образования, 1999. — 145 с.
3. Богданов В.С. Шаровые барабанные мельницы с поперечно-продольным движением загрузки [Текст] / В.С. Богданов. – Белгород, 2002. – 254 с.
4. Богданов В. С. Оптимизация процесса помола в производстве цемента [Текст] / В.С. Богданов, Р.Р. Шарапов, Ю.М. Фадин // Междунар. конгресс производителей цемента 9-12 октября 2008 г. в Белгороде: сб. докл. – М.: Европейский технич. ин-т, 2008. – С. 20-39.
5. Иванов А.Н. Основные принципы усовершенствования шаровых барабанных мельниц [Текст] / А.Н. Иванов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова, 2003. – С. 96-101.
6. Иванов А.Н. Закономерности энергетического режима работы мелющей загрузки трубных мельниц [Текст] / А.Н. Иванов // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: ХДПУ. – 2000. – №1. – С. 8-12.
7. Cement News [Текст] // Cement International. – 2003. – № 6. – Р. 2-3.
8. Cimento Nationale converts two existing cement mill to combi-grinding system [Текст] // International Cement Review. September. – 2001. – Р. 30.
9. De la Foucyardiere, R. Betriebserfahrungen mit der Horomill fuer die Zementmahlung [Текст] / de la R. Foucyardiere // cement International. – 2003. – № 56. – Р. 44-49.
10. Ельцов М.Ю. Исследование эффективности режимов работы шаровых барабанных мельниц в зависимости от конструктивных параметров в программном комплексе EDEM [Текст] / М.Ю. Ельцов, А.А. Козлов, О.В. Тимофеева // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвузовский сборник статей. – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. – С. 490-496.

Рецензент д-р техн. наук Сопов В.П.

---

*Балера Николай Дмитриевич канд. техн. наук, профессор кафедра механизации строительных процессов Харьковский национальный университет строительства и архитектуры. Тел.: (057) 700-02-82.*

*Емельяненко Николай Григорьевич канд. техн. наук, профессор кафедра механизации строительных процессов Харьковский национальный университет строительства и архитектуры. Тел.: (057) 70-00-282.*

*Горголюк Виталий Викентьевич генеральный директор АТ «Евроцемент-Украина». Тел.: (057) 70-00-282.*

*Хахалев Павел Анатолиевич аспирант Белгородский государственный технологический университет имени В.Г.Шухова. Тел.: (4722) 30-99-39.*

*Balera Nicolay Dmitrievich candidate of engineering sciences, professor department of mechanization of building processes Kharkov national university of building and architecture. Tel.: (057) 700-02-82.*

*Emelianenko Nicolay Grigorievich candidate of engineering sciences, professor department of mechanization of building processes Kharkov national university of building and architecture. Tel.: (057) 700-02-82.*

*Gorgolyuk Vitally Vikentievich director general AT «Euro cement-Ukraine». Tel.: (057) 70-00-282.*

*Hahalev Paul Anatolievich graduate student of the Belgorod state technological university of the name V.G. Shuchov. Tel.: (4722) 30-99-39.*

Стаття прийнята 25.05.2015 р