

Богданов В. С., д-р техн. наук, проф.,
Хахалев П. А., аспирант,
Масловская А. Н., канд. техн. наук

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГООБМЕННЫХ ФУТЕРОВОК ШАРОВЫХ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

pavel.hahalev.ne@mail.ru

Изучению работы шаровой мельницы для помола цемента уделяется очень большое внимание. В настоящее время существуют программные продукты, позволяющие производить компьютерное моделирование работы машины. Анализируя результаты экспериментов, инженер подбирает рациональные геометрические параметры изделия, определяют скоростные характеристики и т.д.

В статье описано исследование работы шаровой мельницы в зависимости от различных типов футеровки в программном комплексе EDEM Simulation. Полученные результаты расчетов проанализированы в графическом виде, а также выполнена визуальная оценка работы загрузки мельницы.

Ключевые слова: проектирование, мельница, цемент, EDEM, симуляция, энергия, футеровка.

Развитие современного производства тесно связано с компьютерным моделированием технологических процессов. Компьютерные технологии позволяют облегчить работу инженера при разработке проектной документации и воплощении её в жизнь. С помощью специализированного программного обеспечения инженер-конструктор может создать цифровой макет любого изделия, провести его расчеты, составить программу для станка с ЧПУ, а также выполнить другие действия. Весь этот комплекс мероприятий еще на стадии проектирования позволяет существенно снизить себестоимость продукции и сократить сроки выполнения проекта. В частности, с целью оптимизации геометрической модели конструкции, ведущие научно-исследовательские и проектные организации мира уделяют особое внимание проведению расчетов цифрового макета изделия [1].

EDEM Simulation – программный комплекс на основе метода дискретных элементов. EDEM позволяет симулировать движение частиц любой формы в некотором ограниченном пространстве [2, 3].

Практически на каждом заводе по производству цемента в технологической цепи оборудования установлена шаровая мельница. Одним из направлений совершенствования шаровых мельниц является создание энергообменных футеровок. С помощью EDEM инженер-конструктор может исследовать любую созданную геометрию футеровки (в том числе импортированную из CAD-систем), изменять параметры работы мельницы и, опираясь на итоговый результат симуляции делать выводы о влиянии тех или иных параметров на работу машины [4, 5].

Перед проведением расчетов в программном комплексе EDEM была поставлена задача исследовать зависимость кинетической энергии

мельющих тел от геометрических параметров бронефутеровки на примере мельницы 2,6x1 м.

Цифровая модель мельницы, футерованной бронеплитами представляет собой сложную геометрию, и поэтому заранее была создана в системе Siemens NX и затем импортирована в программный комплекс EDEM Simulation при создании расчетного случая. Диаметр мельницы $D = 2,6$ м, длина исследуемой части барабана $L = 1$ м (рис. 1).

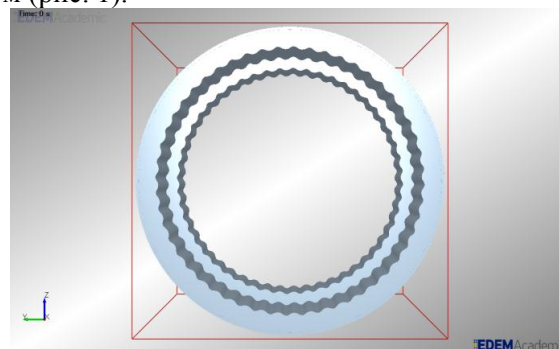


Рис. 1. Расчетная модель исследуемой части барабана мельницы в программном комплексе EDEM Simulation

Входными данными при создании симуляции были заданы следующие параметры [6, 7, 8]:

- диаметр мелющих тел – $d_{ш} = 80$ мм;
- критическая частота вращения – $n_{кр} = 26,97$ об/мин;
- рабочая частота вращения мельницы – $n = 20,4972$ об/мин;
- масса мелющих тел – 6264 кг.

В начале исследования зависимости кинетической энергии движения мелющих тел был проведен расчет волнистой бронефутеровки с исходными размерами, которые соответствуют используемой футеровке первой камеры ТШМ 2,6x13 м. При выполнении расчетов варьируе-

мым параметром была частота вращения барабана: $0,7 \cdot n_{кр}$, $0,76 \cdot n_{кр}$, $0,8 \cdot n_{кр}$.

Следующим этапом исследования стало создание новой геометрической модели футеровки. При сохранении прочих геометрических параметров, был изменен шаг волны футеровки. Таким образом, была исследована футеровка с одной волной при варьировании частоты вращения барабана (значения частоты указаны выше).

На третьем этапе была создана геометрическая модель футеровки с тремя волнами. По аналогии с предыдущими исследованиями, изменялась частота вращения барабана.

После завершения третьего этапа исследования, были созданы три электронно-цифровые модели бронефутеровок с увеличенной высотой волны на $0,1 \cdot d_{ш}$. Прочие геометрические параметры футеровок с двумя, одной и тремя волнами остались неизменны. Затем для каждой модели был создан расчетный случай и исследована зависимость кинетической энергии от частоты вращения барабана.

По окончании выполнения экспериментов были получены следующие данные (табл. 1-3)

Таблица 1

Изменение кинетической энергии E_k футеровки с двумя волнами, Дж

Частота вращения барабана	Высота волны футеровки	
	$h_{исх}$	$h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$
$0,7 \cdot n_{кр}$	8033	10910
$0,76 \cdot n_{кр}$	9480	12734
$0,8 \cdot n_{кр}$	10400	14714

Таблица 2

Изменение кинетической энергии E_k футеровки с одной волной, Дж

Частота вращения барабана	Высота волны футеровки	
	$h_{исх}$	$h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$
$0,7 \cdot n_{кр}$	1984	3931
$0,76 \cdot n_{кр}$	2333	4627
$0,8 \cdot n_{кр}$	2574	5075

Таблица 3

Изменение кинетической энергии E_k футеровки с тремя волнами, Дж

Частота вращения барабана	Высота волны футеровки	
	$h_{исх}$	$h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$
$0,7 \cdot n_{кр}$	11081	11765
$0,76 \cdot n_{кр}$	13182	13848
$0,8 \cdot n_{кр}$	14602	15358

По результатам проведенных расчетов были построены графики зависимости кинетической энергии от частоты вращения при различной высоте футеровки и количестве волн (рис. 3-5).

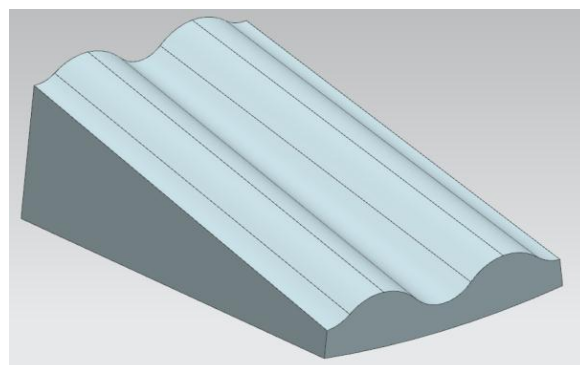


Рис. 2. Цифровая модель футеровки с исходными параметрами

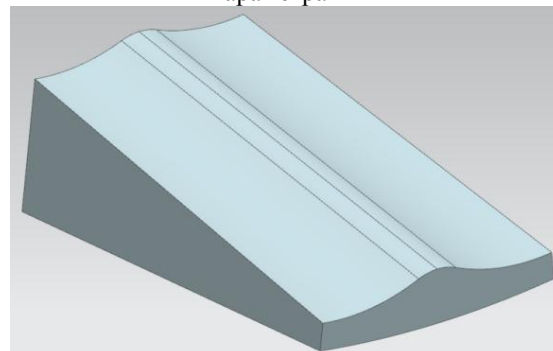


Рис. 3. Цифровая модель футеровки с одной волной при исходной высоте волны

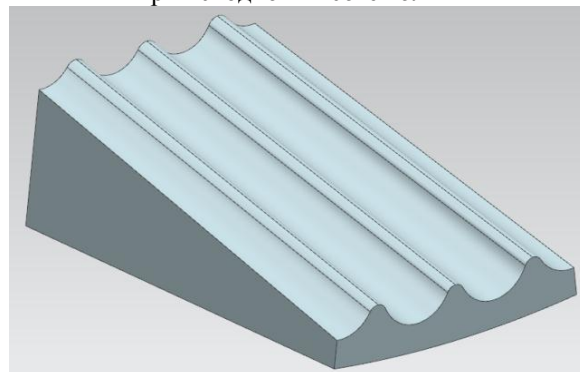


Рис. 4. Цифровая модель футеровки с тремя волнами при исходной высоте волны

а

б

в

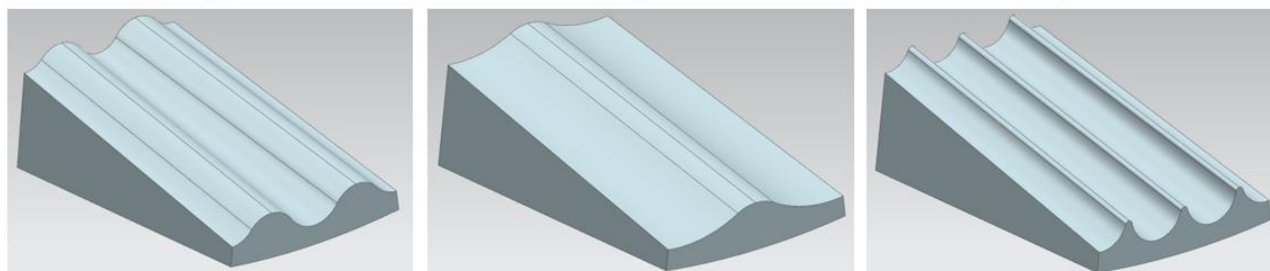


Рис. 5. Цифровые модели футеровок с увеличенной высотой волны на $0,1 \cdot d_{ш}$: а – две волны; б – одна волна; в – три волны

Рассмотрим график, изображенный на рис. 6. С увеличением частоты вращения барабана от $0,7 \cdot n_{кр}$ до $0,8 \cdot n_{кр}$ кинетическая энергия E_K мелющих тел при любой высоте волны футеровки возрастает. При исходной высоте волны, когда частота вращения барабана составляет $0,7 \cdot n_{кр}$, $E_K=8033$ Дж, при $0,8 \cdot n_{кр}$ $E_K=10400$ Дж. С увеличением высоты волны на $0,1 \cdot d_{ш}$ кинетиче-

ская энергия E_K равняется 10910 Дж при $0,7 \cdot n_{кр}$ (возрастает на 36%) и 14714 Дж при $0,8 \cdot n_{кр}$ (возрастает на 41%).

При изучении данных, полученных в результате экспериментов с моделью мельницы с одной волной (рис. 7) видно, что увеличение частоты вращения ведет к постепенному возрастанию кинетической энергии E_K мелющих тел.

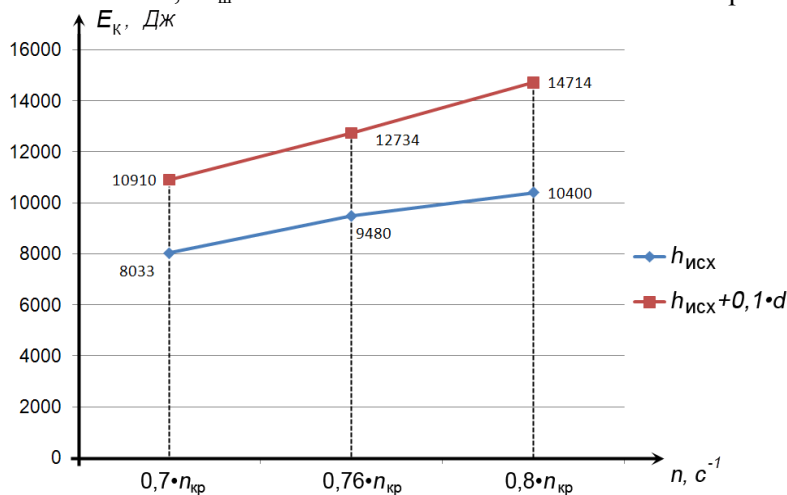


Рис. 6. Зависимость кинетической энергии мелющих тел от изменения высоты волны футеровки при различной частоте вращения барабана

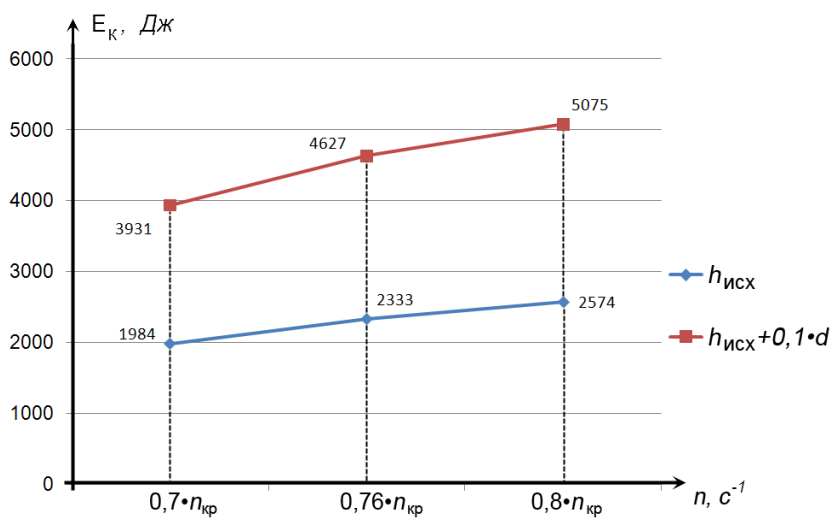


Рис. 7. Зависимость кинетической энергии мелющих тел от изменения высоты волны футеровки с одной волной при различной частоте вращения барабана.

Так, при исходной высоте волны, когда частота вращения барабана составляет $0,7 \cdot n_{кр}$, $E_K=1984$ Дж, при $0,8 \cdot n_{кр}$ $E_K=2574$ Дж. Увеличив высоту волны на $0,1 \cdot d_{ш}$ видно, что кинетическая энергия E_K равняется 3931 Дж при $0,7 \cdot n_{кр}$ (возрастает на 98%) и 5075 Дж при $0,8 \cdot n_{кр}$ (возрастает на 97%). Таким образом, можно говорить о колоссальном приросте кинетической энергии при увеличении высоты волны футеровки с одной волной.

При анализе графика, изображенного на рис. 8, зависимость E_K от высоты футеровки при различной частоте вращения барабана n можно описать следующим образом. Так, при исходной

высоте волны, когда частота вращения барабана составляет $0,7 \cdot n_{кр}$ $E_K=11081$ Дж, при $0,8 \cdot n_{кр}$ $E_K=14602$ Дж. При увеличении высоты волны на $0,1 \cdot d_{ш}$ прирост кинетической энергии E_K при $0,7 \cdot n_{кр}$ составил 6% ($E_K=11765$ Дж) и 5% при $0,8 \cdot n_{кр}$ ($E_K=15358$ Дж).

Выполним визуальную оценку качественной и количественной характеристики работы загрузки (рис. 9-12). Максимальная кинетическая энергия шаров показана красным цветом, минимальная – синим.

Для мельницы с исходной высотой волны футеровки целесообразно выбрать частоту вращения $0,76 \cdot n_{кр}$ (рис. 9, б). При увеличении волны

на $0,1 \cdot d_{ш}$ количество шаров с максимальной кинетической энергией наблюдается при частоте

вращения $0,8 \cdot n_{кр}$ (рис. 9, е).

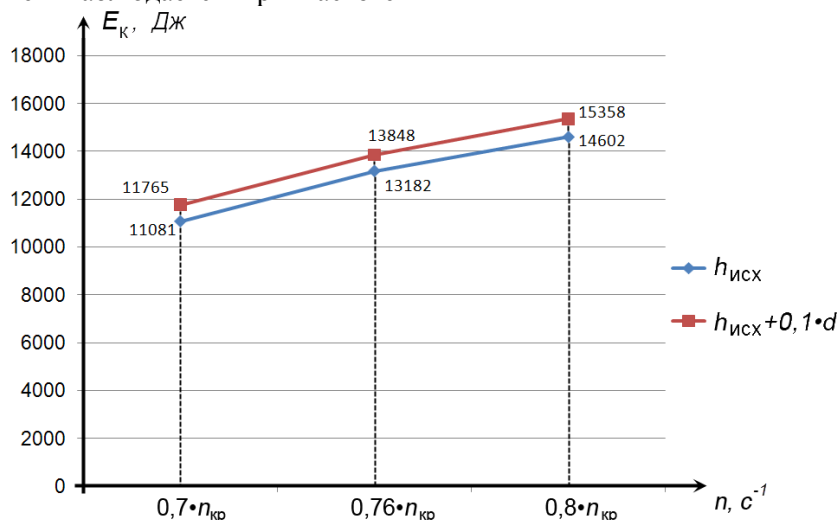


Рис. 8. Зависимость кинетической энергии мелющих тел от изменения высоты волны футеровки с тремя волнами при различной частоте вращения барабана

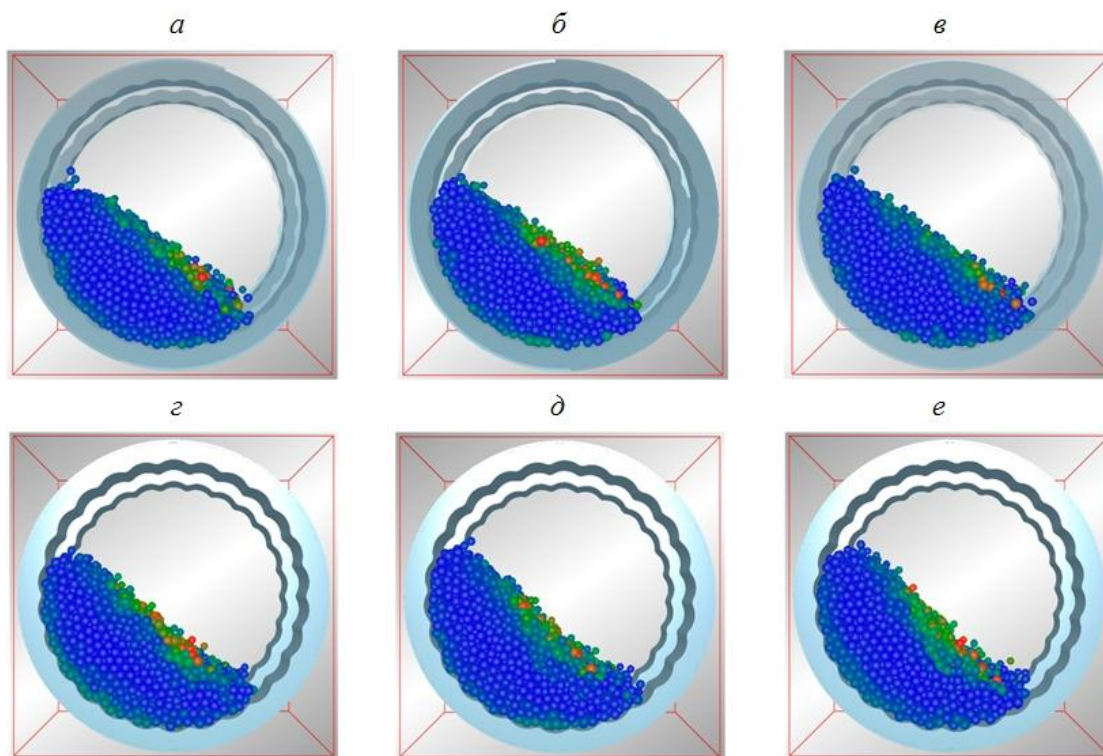


Рис. 9. Схема движения мелющих тел в мельнице с футеровкой с одной волной:

а – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,7 \cdot n_{кр}$; б – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,76 \cdot n_{кр}$; в – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,8 \cdot n_{кр}$; г – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,7 \cdot n_{кр}$; д – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,76 \cdot n_{кр}$; е – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,8 \cdot n_{кр}$

При увеличении количества волн футеровки коэффициент сцепления возрастает, и, например, при частоте $0,7 \cdot n_{кр}$ мелющие тела поднимаются на большую высоту и обладают большей потенциальной энергией (рис. 10, а). Футеровка с высотой волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$ способствует увеличению количества шаров, обладающих максимальной кинетической энергией (по сравнению с $h_{исх}$). При частоте вращения барабана мельницы $0,8 \cdot n_{кр}$ наблюдается переход в сме-

шанный режим работы (рис. 10, е).

В мельнице с футеровкой с тремя волнами кинетическая энергия движения шаров уже при частоте вращения $0,7 \cdot n_{кр}$ (рис. 11, а) значительно возрастает по сравнению с выше рассмотренными моделями. При $0,76 \cdot n_{кр}$ E_k возрастает еще больше (рис. 11, б). Однако, при $0,8 \cdot n_{кр}$ (рис. 11, в) мелющие тела начинают падать на футеровку, что значительно снижает её эксплуатационные характеристики и делает её использование неце-

лесообразной.

Высокие показатели работы мельницы наблюдаются при высоте волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$ и частоте вращения $0,7 \cdot n_{кр}$ и $0,76 \cdot n_{кр}$ (как и реко-

мендовано промышленностью, рис. 12, $з, д$ [9, 10]). Как видно, при частоте вращения $0,8 \cdot n_{кр}$ начинается износ футеровочных плит (рис. 10, $е$).

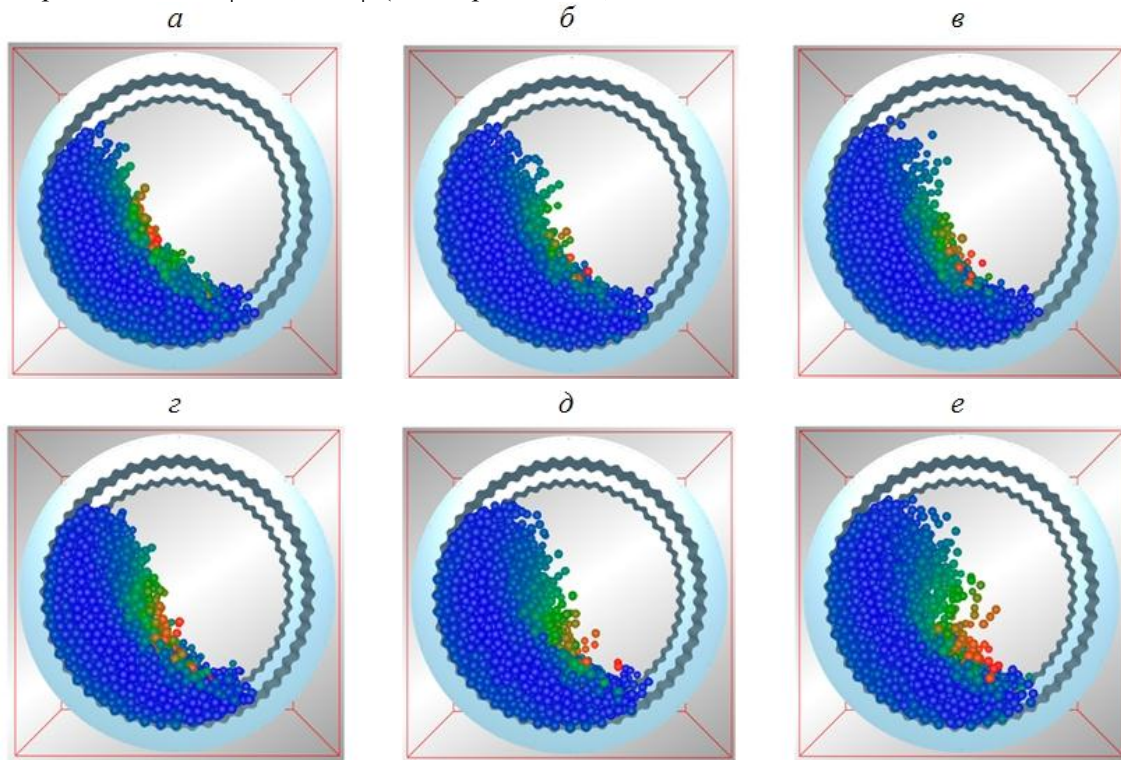


Рис. 10. Схема движения мелющих тел в мельнице с футеровкой с двумя волнами:
 a – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,7 \cdot n_{кр}$; $б$ – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,76 \cdot n_{кр}$; $в$ – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,8 \cdot n_{кр}$; $г$ – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,7 \cdot n_{кр}$; $д$ – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,76 \cdot n_{кр}$; $е$ – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,8 \cdot n_{кр}$

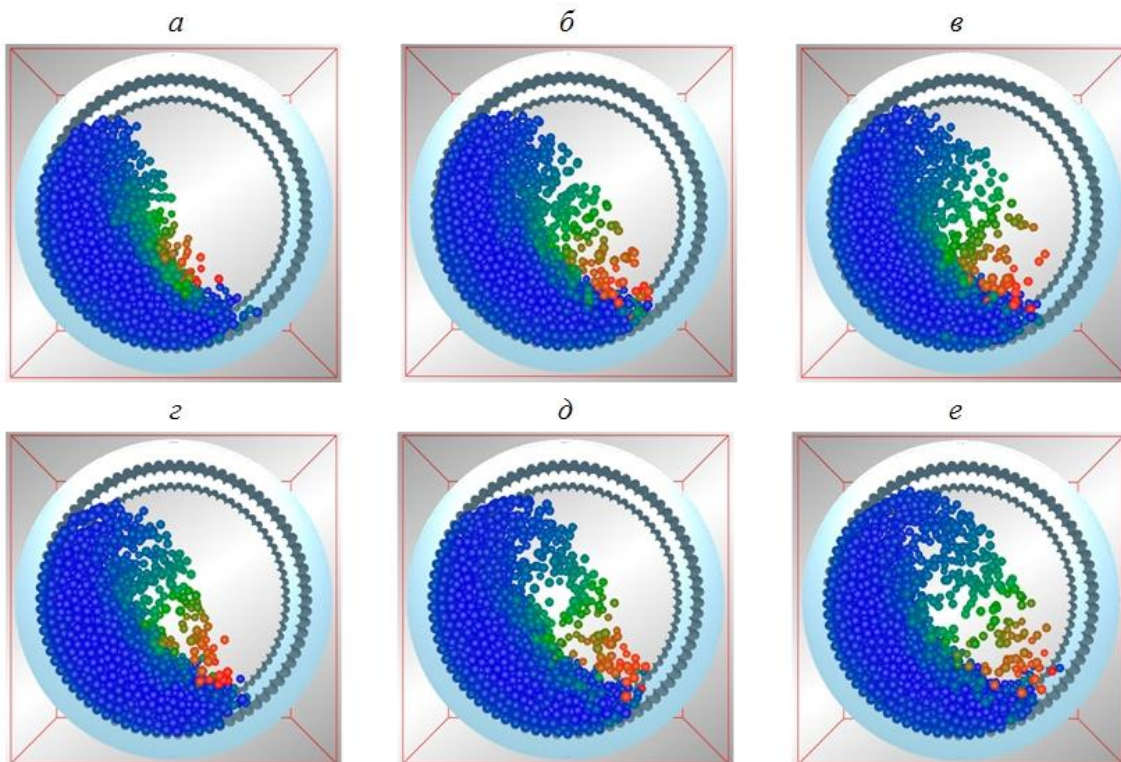


Рис. 11. Схема движения мелющих тел в мельнице с футеровкой с двумя волнами:
 a – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,7 \cdot n_{кр}$; $б$ – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,76 \cdot n_{кр}$; $в$ – высота волны $h_{исх}$, частота вращения $0,8 \cdot n_{кр}$; $г$ – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,7 \cdot n_{кр}$; $д$ – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,76 \cdot n_{кр}$; $е$ – высота волны $h_{исх} + 0,1 \cdot d_{ш}$, частота вращения $0,8 \cdot n_{кр}$

Разработанная методика впервые позволила определить кинетическую, потенциальную, суммарную энергию шаров в барабанной мельнице с учетом от частоты вращения, профиля футеровки, коэффициента загрузки, сцепления шаров, так как ранее невозможно было аналитически определить энергетические параметры и связать их с конструктивными параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мукажанов Е. Б., Кенесович С. Н. Автоматизация проектирования технологических процессов [Электронный ресурс]. URL: http://www.rusnauka.com/29_DWS_2011/Tecnic/1_2_95591.doc.htm (дата обращения 18.07.2013).
2. Официальный сайт фирмы DEM Solutions LTD: [web-сайт]. – Режим доступа: <http://www.dem-solutions.com> (дата обращения 18.07.2013).
3. EDEM User Manual, Copyright © 2002-2009 DEM Solutions.
4. Potentials for energy efficiency improvement in the us cements industry / E. Worrell, N. Martin, L. Price // Energy. 2000. № 12. P. 1189 - 1214.
5. Kroger H., Ramesohl H. Innovation Through Tradition // World Cement. November. 2003. P. 157 - 159.
6. Андреев А. А., Кулаков А. Г. О модели процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице // Обогащение руд. 2009. №4. С. 3 - 7.
7. Повышение эффективности работы цементных мельниц / В. С. Богданов, Ю. М. Фадин, С. С. Латышев, Д. В. Богданов, О. Р. Соловьев // Цемент и его применение. 2006. № 6. С. 80 - 85.
8. Несмеянов Н.П., Круговой Д.Г. Разработка математического описания движения мельющих тел для различного профиля футеровки шаровых мельниц // Научные исследования, наносистемы и ресурсо-сберегающие технологии в стройиндустрии: Сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2007. Ч.7. С. 172–176.
9. Тонкое измельчение в шаровых мельницах [Электронный ресурс]. URL: http://samlit.com/izmel/sharovye_sterzhnevye_melnicy-principy_raboty.htm (дата обращения 18.07.2013).
10. Ханин С.И., Севостьянов В.С. Расчёт зон контакта энергообменных устройств с мельющей загрузкой барабанных мельниц // Цемент. 1991. № 1-2. С. 49-54.