

УДК 621.926.5

Іванов Анатолій Миколайович, д-р техн. наук, проф., професор кафедри механізації будівельних процесів
Крот Олександр Юлійович, д-р техн. наук, доц., професор кафедри механізації будівельних процесів
Крот Ольга Петрівна, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри безпеки життєдіяльності та інженерної екології
 Харківський національний університет будівництва та архітектури, м.Харків, Україна, вул. Сумська, 40, кімн. 239, 057-7000-282, docent_man@mail.ru

ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ТРУБНИХ МЛИНІВ ШЛЯХОМ ПОПЕРЕДНЬОГО ПОДРІБНЕННЯ

Обґрунтовано доцільність попереднього подрібнення клинкеру перед подачею його в трубні млини і визначений максимальний раціональний розмір часток, який повинен мати матеріал перед подачею в трубні млини. Проведено аналіз існуючих конструкцій попередніх подрібнювачів і дані рекомендації з вибору раціональної конструкції.

Ключові слова: попереднє подрібнювання, клинкер, трубний млин, барабанно-валковий переробник, міцність частинок, енергоємність.

УДК 621.926.5

Іванов Анатолій Николаевич, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры механизации строительных процессов
Крот Александр Юльевич, д-р техн. наук, доц., профессор кафедры механизации строительных процессов
Крот Ольга Петровна, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии
 Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, ул. Сумская, 40, комн. 239, 057-7000-282, docent_man@mail.ru

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЁМКОСТИ ТРУБНЫХ МЕЛЬНИЦ ПУТЁМ ПРЕДИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Обоснована целесообразность предварительного измельчения клинкера перед подачей его в трубные мельницы и определён максимальный рациональный размер частиц, который должен иметь материал перед подачей в трубные мельницы. Проведен анализ существующих конструкций предизмельчителей и даны рекомендации по выбору рациональной конструкции.

Ключевые слова: предварительное измельчение, клинкер, трубная мельница, барабанно-валковый переработчик, прочность частиц, энергоёмкость.

UDK 621.926.5

Ivanov Anatoly Nikolaevich, Dr. Eng. Sc., Prof., professor of chair of mechanization of construction processes
Krot Aleksandr Yulievich, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., professor of chair of mechanization of construction processes
Krot Olga Petrovna, Cand. Sc., Assoc. Prof., associate professor of chair of life safety and environmental engineering
 Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv city, Ukraine, Sumskaaya street, 40, Room 239, 057-7000-282, docent_man@mail.ru

REDUCTION OF POWER CONSUMPTION OF TUBE MILLS USING PRE-GRINDING

The paper justifies the expediency of preliminary grinding of clinker before it is fed to the tube mills and determines maximum practical size particles of material before it is fed to tube mills. It analyzes of existing designs of pre-grinders and gives recommendations as to the choice of a practical design.

Key words: pre-grinding, clinker, tube mill, drum-and-roll mill, particle strength, power consumption.

Введение

Известно, что поступающий в трубные мельницы клинкер на большинстве цементных заводов имеет размер крупнее 10 мм. Поэтому первые камеры трубных мельниц выполняют роль дробилок, что для них совершенно не эффективно. В этой связи предварительное дробление клинкера является большим резервом повышения производительности трубных мельниц и снижения удельного расхода энергии.

Идея предварительного измельчения материалов основана на теории «наследственности»: чем меньше размер поступающих в трубную мельницу частиц, тем меньше и размер выходящих (соотношение их характеризует степень измельчения конкретной дробилки или мельницы). Так как между диаметром шара и размером частиц измельчаемого материала есть определенные зависимости, то уменьшение размера поступающих частиц материала снижает диаметр шаров. Благодаря этому уменьшается их

износ и износ футеровки, увеличивается число шаров, т.е. и количество ударов по частицам материала, что повышает эффективность процесса измельчения. Всё это говорит об актуальности проблемы.

Исследования ведутся по таким трём основным направлениям:

- определение оптимальной степени предварительного дробления;
- подбор и разработка соответствующих конструкций предизмельчителей;
- создание современных технологических схем измельчения (ТСИ).

Следует отметить, что создание современной ТСИ является комплексной задачей и включает ряд научных, технологических и инженерных аспектов.

Цель исследования – решение этих вопросов.

Основная часть

С уменьшением размера частиц напряжения для их разрушения возрастают, а с увеличением уменьшаются. Это связано с наличием в крупных частицах микротрещин, несовершенством их кристаллической решетки, дислокациями и т. д. Поэтому размер поступающего в мельницы клинкера оказывает существенное влияние на эффективность их работы.

Так, по данным Карякина С. Ф. предварительный помол клинкера в конусных и валковых дробилках до 3 мм повышает производительность трубных мельниц на 20–30 % [1].

По данным Лурье Ю. С. питание мельницы клинкером не выше 8–10 мм повысило их производительность на 25–30 % [1].

Крыхтин Г. С. при снижении крупности исходного материала от 30 мм до 10 мм и затем с 10 до 3 мм получил увеличение производительности мельницы в первом случае на 28 %, во втором – на 59 % [1].

А. Л. Панин [1] опубликовал данные по работе трубной мельницы на клинкере, подвергнутом дроблению в молотковой дробилке. При переходе от рядового клинкера средней крупности 28 мм на дробленый, крупностью 16 мм, производительность мельницы повысилась на 20 % при сохранении тонкости помола.

Установлено, что при подаче клинкера размером менее 3 мм производительность мельницы увеличивается до 40 % и снижается энергоёмкость процесса измельчения до 30 % [1].

К сожалению, в имеющихся исследованиях отсутствуют данные по наибольшему рациональному размеру частиц, которые целесообразно подавать в трубные мельницы исходя из эффективности их работы и специфических особенностей.

Ивановым А. Н. разработана методика для определения такого размера. Эта методика учитывает изменение прочности частиц от их крупности

С этой целью проводили опыты по установлению зависимости прочности частиц клинкера и других материалов от их крупности. Отсеивали по 30–40 частиц клинкера каждого из следующих размеров: 0,5; 1; 2; 7 и 15 мм. Прочность частиц определяли путем раздавливания их на специально созданном стенде. За прочность принимали отношение среднеарифметического значения сил, разрушающих частицы к среднеарифметическому значению площадей поперечных сечений частиц. Диаметр каждой частицы определяли в двух плоскостях, развернутых на 90°.

Результаты проведенных испытаний даны на рис.1, из которого видно, что напряжения разрушения практически не изменяются начиная с частиц размером 7 мм. Этот размер и является искомым, т.е. максимальный размер клинкера данной прочности, подаваемый в шаровые или трубные мельницы, не должен превышать 7 мм.

Итак, для определения искомого размера строят экспериментальный график зависимости прочности частиц (σ) от их размера (d). За искомым максимальным размером частиц материала, подаваемого в трубные мельницы, принимаем тот размер, начиная с которого прочность частиц практически не уменьшается.

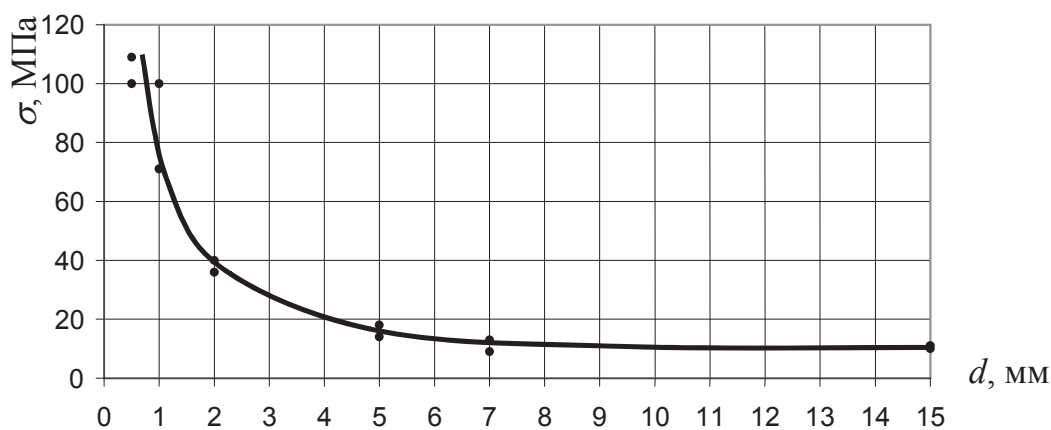


Рис. 1. Зависимость прочности частиц от их размеров

В последние годы в качестве предизмельчителей получили распространение прессвалки, в которых реализуется новый принцип измельчения – "внутрислойное принудительное самоизмельчение", сущность которого состоит в том, что между измельчающими поверхностями происходит разрушение в слое материала, образованном из отдельных зерен, под воздействием высокого давления. При этом отдельные зерна передают давление на соседние. Происходит разрушение большей их части, а в части зерен, при сохранении их размера, образуются микро- и макротрещины по всему объему. Отличительной чертой процесса является:

- высокое давление (≥ 50 МПа), передаваемое измельчаемому материалу, под влиянием которого происходит изменение физических свойств частиц, их разупрочнение, что способствует снижению энергозатрат на дальнейшее измельчение;

- одновременное протекание двух процессов – разрушение и агломерация разрушенного материала с образованием плотной (но не прочной) "ленты" из спрессованного материала.

"Измельчение в слое" происходит при строго определенных условиях: объем материала, подаваемый на валки за определенный период времени, должен превышать объем материала, образующийся между валками материала в зависимости от ширины и окружной скорости валков.

Валки захватывают определенное количество материала из вышележащего слоя, соответствующее давлению, передаваемому гидросистемой. Более крупные зерна предварительно измельчаются в верхней зоне между валками, и только затем происходит разрушение по принципу "измельчения в слое". Степень измельчения материала в ПВИ, оцениваемая по величине характеристического размера зерна – d' , достигает 50.

Зависимость эффекта измельчения от величины давления на валки выражается в виде кривой с "насыщенным максимумом", свидетельствующим о существовании рациональной области давления в ПВИ.

Прессвалковый измельчитель ПВИ позволяет реализовать весьма экономичный принцип раздавливания частиц клинкера в слое с одновременным их микродеформированием в сравнительно простом агрегате. Он может применяться для предизмельчения клинкера и добавок в комплексе с трубной мельницей. Как показали исследования, минералы портландцементного клинкера (алит, белит, минералы жидкой фазы) существенно отличаются по твердости 400–800 кг/мм². В тоже время предел прочности клинкерного зерна на сжатие составляет в среднем 52...55 МПа [2].

Исследования показали целесообразность способа внутрислойного измельчения для клинкера, в ходе которого происходит взаимодействие твердых и "менее твердых" кристаллов. Процесс эффективного измельчения клинкера в ПВИ идет уже при давлении 5–10 МПа. При сравнительно небольших затратах энергии – 4...5 кВт/т на измельчение и 1 кВт/т на дезагрегацию – в продукте содержится 30..35 % готовой фракции минус 80 мкм.

Оптимальным давлением является 15,0...20,0 МПа. Уже при таких значениях давления процесс измельчения в ПВИ характеризуется глубокими деформациями клинкерных минералов с развитием макро- и микротрещин по всему объему зерна. После дезагрегации зерновой состав продукции характеризуется коэффициентом однородности, $n = 0,7$ и $d' = 480$ мкм [3].

Экспериментальные данные подтверждают уровень удельных энергозатрат в 3..5 кВт/т на прессвалковый способ предизмельчения клинкера. При этом продукт по физико-технологическим свойствам примерно соответствует материалу, измельченному в первой камере цементной мельницы 3,2 x 15 м открытого цикла.

Реализация в цементной промышленности способа "измельчения в слое" значительно повышает эффективность измельчения.

Однако прессвалковые измельчители имеют следующие недостатки:

- небольшой угол захвата;
- малые производительности из-за низких частот вращения валков;
- невозможность одновременного измельчения и сушки материалов;
- неоднородность гранулометрического состава готового продукта из-за неравномерного износа валков по ширине, что приводит к увеличению зазора в средней части валков [3].

С целью устранения этих недостатков на кафедре механизации строительных процессов с участием авторов разработана новая конструкция барабанно-валкового измельчителя (БВИ, рис. 2) [4].

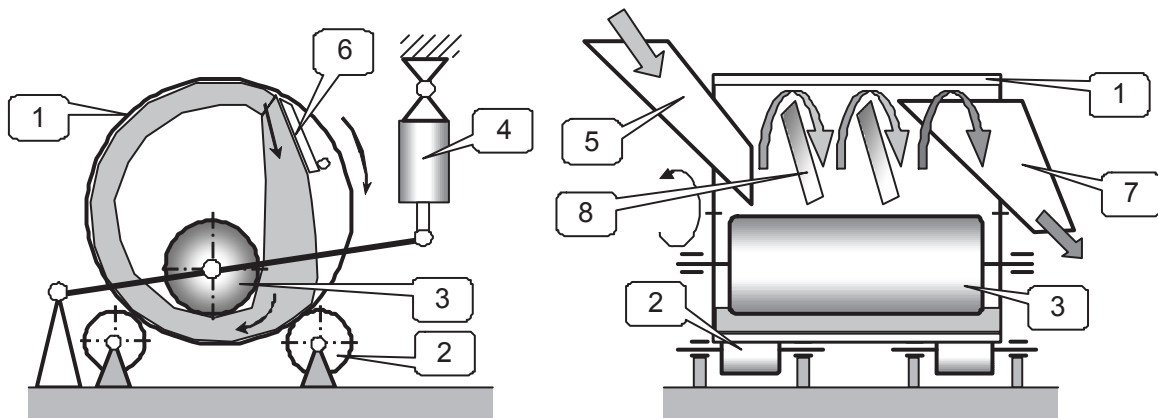


Рис. 2. Схема барабанно-валковой машины непрерывного действия
1 - барабан, 2 - ролики, 3 - валок, 4 - устройство для прижима валка к внутренней поверхности барабана, 5 - загрузочный лоток, 6-нож, 7-разгрузочный лоток, 8-направляющий элемент для регулирования осевого перемещения материала

Машина состоит из цилиндрического барабана 1, который установлен на роликах 2 и вращается с сверхкритической скоростью от специального привода. Внутри барабана находится валок 3, который может катиться по внутренней поверхности барабана. Валок 3 прижимается к барабану устройством 4, например, пневматическим. В верхней части к барабану прижимается нож 6. Загрузка и разгрузка материала осуществляется лотками 5 и 7. Внутри барабана установлены направляющие элементы 8 для регулирования скорости передвижения материала вдоль барабана. Материал (клинкер) загружается в барабан через лоток 5, прокатывается между валиком 3 и барабаном 1, претерпевая механическое воздействие, поднимается вместе с барабаном, срезается ножом 6, падает и вновь подвергается воздействию валка 3. Этот цикл многократно повторяется, при этом материал передвигается вдоль барабана за счет подпора или с помощью специальных устройств, после чего разгружается через лоток 7.

Благодаря своим достоинствам, разработанная с участием авторов статьи новая серия

помольных агрегатов является наиболее эффективным перспективным оборудованием для помола и сушки материалов разной твердости и влажности. БВИ могут использоваться не только как предизмельчители, но и как основное помольно-сушильное оборудование, особенно для минизаводов.

Оборудование существующих помольных установок с предизмельчителями БВИ позволяет увеличить их производительность до 50 % а высокая надежность и долговечность БВИ вызывает большой интерес к ТСИ с БВИ.

ТСИ с БВИ-ТМ-СД (барабанно-валковый измельчитель – трубная мельница – сепаратор динамический) по удельным энергозатратам и материалоемкости обладает на 20 % меньшей металлоемкостью, а производительность на 40 % выше, чем ТСИ "ТМ-СД". При этом одним из основных преимуществ является возможность повышения активности цемента в результате оптимизации зернового состава и более полного раскрытия активности клинкерного компонента при измельчении высококачественных цементов (ВКЦ).

К основным выводам из современных представлений о процессах измельчения портландцементного клинкера следует отнести положение, согласно которому необходимым условием эффективного измельчения является обеспечение стадийности процесса, отвечающего природе клинкера (поликристаллическая структура, селективность и т. д.). Стадия предизмельчения целесообразна в условиях ударно-раздавляющих воздействий с возможно более быстрым удалением продукта измельчения; стадия грубого измельчения – в условиях раздавливающе-стирающих воздействий с выделением на этой стадии готового продукта и доизмельчением крупной фракции; стадия тонкого измельчения – в измельчителях истирающего действия или работающих по принципу высокоскоростного удара.

В качестве предизмельчителей можно рекомендовать и конусные инерционные дробилки МЕХАНОБР (а), но они более сложны в изготовлении и в эксплуатации по сравнению с БВИ. Способ "внутрислойного самоизмельчения", реализуемый в системах с ПВИ и конусно-инерционными дробилками (КИД), обеспечивает повышение эффективности процесса предизмельчения клинкера (60...70 % по классу + 80мкм) в сравнении со стержневой мельницей на 25...50 %. Помольные системы с использованием "слоевых" измельчителей по энергозатратам на 10...20 % более эффективны, чем системы с трубными мельницами.

По сравнению с прессвалковыми измельчителями разработанные на кафедре механизации строительных процессов ХНУСА барабанно-валковые измельчители (БВИ) имеют следующие преимущества:

- большую производительность за счет большей частоты вращения валков при сверхкритической частоте вращения корпуса мельницы;
- больший в 4 раза угол захвата;
- возможность одновременного измельчения и сушки материалов;
- возможность повторного неоднократного прохождения измельчаемого материала под валками, что снижает усилие прижима валков.

Процесс измельчения в БВИ характеризуются глубокими деформациями клинкерных минералов с развитием макро- и микротрещин по всему объему зерна. Необходимым условием эффективного измельчения является обеспечение стадийности процесса, отвечающего природе клинкера (поликристаллическая структура, селективность и т. д.). Стадия предизмельчения целесообразна в условиях ударно-раздавляющих нагрузок с возможно более быстрым удалением продукта измельчения. Техничко-экономическая эффективность БВИ обусловлена реализацией на стадии предизмельчения довольно экономичного процесса «внутрислойного самоизмельчения», в условиях которого осуществляется один из экономичных способов разрушения – сдавливание со сдвигом [2].

Применительно к процессу измельчения в БВИ портландцементный клинкер с различной микротвердостью клинкерных минералов является идеальной системой для реализации принципа «внутрислойного самизмельчения» и возникновения эффекта

селективного измельчения, снижающего удельные энергозатраты. БВИ могут быть использованные не только как предизмельчители, но и как самостоятельные агрегаты. Следует отметить, что БВИ успешно применяют и для механической активации строительных материалов.

На рис. 3 идентифицированы зависимости $n = f(d')$, так относительно ТСИ с ТМ в открытом цикле имеем кривую с максимумом для $n = 0,86$ и $d' = 20$ мкм, в замкнутом цикле с ТМ-СД кривая имеет насыщенный максимум ($n = 0,82$ $d' = 15$ мкм): а с предизмельчителем БВИ-ТМ-кривая имеет размытый максимум ($n = 0,95$ $d' = 15$ мкм): ТСИ с предизмельчителем и сепаратором – БВИ-ТМ-СД имеет вид экспоненциальной кривой с достижением $n = 1,05$, $d' = 10$ мкм.

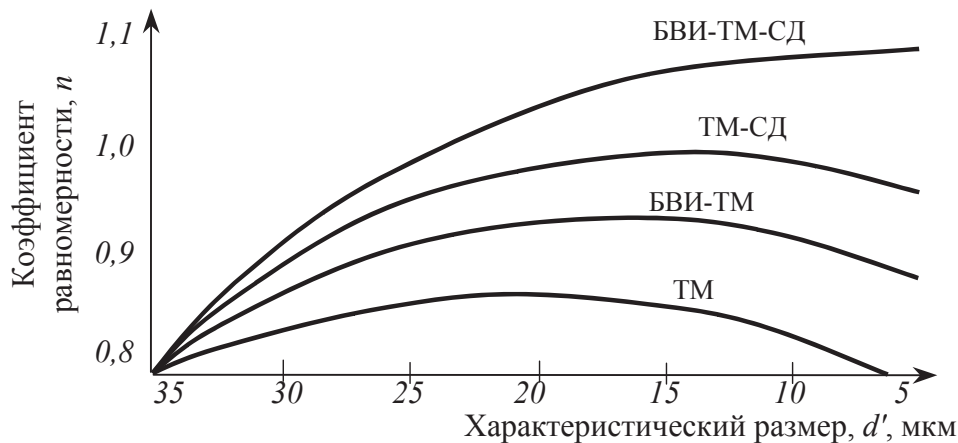


Рис.3. Зависимость $n=f(d')$ для различных технологических схем измельчения

Таблица 1

Оценка эффективности систем измельчения с мельницей размером 4х13м
($S=4000\text{см}^2/\text{г}$, $\mathcal{E}_{\text{инд.проб}} = 29,3\text{кВтч/т}$)

Показатели	ТСИ			
	ТМ	ТМ-СД	БВИ-ТМ	БВИ-ТМ-СД
Производительность,				
т/ч	45	56	60	77
%	80	100	107	137
Удельные энергозатраты на измельчение,				
кВт*ч/т	70	57	55	45
%	122	100	94	77
Металлоёмкость,				
т/(т/ч)	14	12,2	11,4	9,4
%	115	100	93	77

При анализе эффективности технологических систем измельчения ТСИ) трубных мельниц (ТМ) с БВИ и с сепараторами динамическими (СД), приведенными в табл. 1. надо учитывать, что одним из основных преимуществ этой схемы является возможность повышения активности цемента (его марочности) за счет оптимизации его зернового состава (ЗС).

В связи с ростом потребностей в высококачественных цементах (ВКЦ) возникла проблема ввода новых дополнительных (кроме удельной поверхности и величин остатков на контрольных ситах) критериев зернового состава. Эти критерии – характеристический диаметр d' , соответствующий 36,8 % остатка на сите диаметром d , и коэффициенту равномерности n , характеризующий дисперсию распределения фракций, которая тем больше, чем меньше значение n . Чем меньше значение d' , тем выше степень дисперсности измельчаемого материала.

Принято считать, что более полно активность цемента характеризуется содержанием фракций +3 -30 и 3 мкм.

Варьируя соотношением этих фракций можно формировать заданные марки цемента, но при меньших (на 15–20 %) удельных энергозатратах.

Выводы

Так как поступающий в трубные мельницы материал на большинстве цементных заводов имеет размер крупнее 10 мм, первые камеры трубных мельниц выполняют роль дробилок, что для них совершенно не эффективно. В этой связи предварительное дробление материалов, основанное на теории «наследственности», является большим резервом повышения производительности трубных мельниц и снижения удельного расхода энергии.

Прочность частиц измельчаемого материала зависит от их крупности, причём напряжения разрушения практически не изменяются начиная с определённого размера. Этот размер и является тем искомым максимальным размером для материала данной прочности, который целесообразно подавать в трубные мельницы. Для определения этого размера строят экспериментальный график зависимости прочности частиц от их размеров. За искомым принимаем тот размер, начиная с которого прочность частиц практически не уменьшается.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку новых конструкций предизмельчителей и на совмещение процесса предизмельчения с процессом активации строительных материалов, что даст существенный экономический эффект, особенно с учётом больших объёмов их переработки, и возможность составлять перспективные ТСИ. Разработка новых способов и приборов экспресс-анализов дисперсности порошков ускорит решение проблемы оптимизации зернового состава и формирования заданных марок вяжущих материалов при меньших удельных энергозатратах их производства.

Список литературы

1. Исследование дробления порландцементного клинкера в центробежной роторной дробилке / Товаров В.В., Оскаленко Г.Н. // Труды ВНИИЦЕММАШ(а), вып. VI, Тольяти, 1966 г. – С. 107–115.
2. Богданов В.С. Механическое оборудование предприятий промышленности стройматериалов. Оборудование для помола материалов / Богданов В. С., Пироцкий В. З., Несмеянов Н. П., Морозов А. И. – Белгород: Изд-во БГТУ, 1998 – 180 с.
3. Шляхи інтенсифікації процесу подрібнення / Иванов А. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Хімія, хімічна технологія та екологія. – Харків: НТУ «ХПІ». 2006. – Вип. 44. – С. 151–157.
4. Крот О. Ю. Наукові основи створення обладнання для механічної активації та пресування будівельних сумішей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.05.02 «Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій» / Крот О. Ю. – Харків, 2013. – 36 с.

References:

1. Products, V. V. & Oskalenko, G. N. (1966). Study crushing portland cement clinker in rotary centrifugal crusher [Issledovanie drobleniya portlandtsementnogo klinkera v tsentrobezhnoy rotornoy drobilke], *Proceedings VNIITSEMMASH (a), vol. VI, Togliatti*, P. 107 - 115.
2. Bogdanov, V. S. & Pirotsky, V. Z., Nesmeyanov, N. P., Morozov, A. I. (1998). Mechanical equipment of enterprises of building materials industry. Equipment for grinding materials [Mehanicheskoe oborudovanie predpriyatiy promyshlennosti stroymaterialov. Oborudovanie dlya pomola materialov], *Belgorod Univ. BSTU*, – 180 p.
3. Ivanov, A. N. (2006), Ways to intensify the process of grinding [Shlyahi Intensifikatsiyi protsesu podribnenniya], *Journal of NTU "KPI". Chemistry, Chemical Engineering and Environment*. - Kharkov: NTU "KPI" . - Vol. 44. – P. 151–157.
4. Krot, O. Yu. (2013), The scientific basis for the creation of equipment for mechanical activation and compacting mortars [Naukovі osnovi stvorenniya obladnannya dlya mehanichnoyi aktivatsiyi ta presuvannya budivelnih sumishey]: Author. Thesis. for obtaining sciences. degree of Doctor. Sc. sciences specials. 5.05.02 "Machinery for the production of building materials and structures". – Kharkov. – 36 p.

Поступила в редакцию 18.06 2014 г.