

# ВНУТРИМЕЛЬНИЧНОЕ УСТРОЙСТВО ТРУБНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ПОМОЛЕ КЛИНКЕРА И ДОБАВОК

v.bogdanov1947@gmail.com

Богданов В.С., д-р техн. наук, проф.,  
Фадин Ю.М., канд. техн. наук, проф.,  
Латышев С.С., канд. техн. наук, доц.

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

**Аннотация.** В статье представлена методика определения мощности, потребляемой главным приводом трубной мельницы оснащенной внутримельничным устройством.

**Ключевые слова:** цемент, помол, трубная мельница, рецикл, классификация, внутримельничное устройство, радиальный лифтер, движение.

За последние 10 лет годовой выпуск цемента в РФ вырос в 1,5 раза с 45,6 млн. тон в 2004 году до 68,4 млн. тон в 2014 году. Выдержав падение объемов производства в 2008-2009 годах (рис. 1) цементная промышленность преодолела отметку в 60 млн. тон (2012 г.).



Рисунок 1 – Объемы производства цемента в России в 2007-2014 гг

Достижению новой отметке в 70 млн. тон препятствует целый ряд экономических и политических обстоятельств, которые привели к

снижению объемов строительства и как следствие к снижению спроса на рынке строительных материалов.

В обстановке резко снижающихся темпов прироста годового выпуска, в промышленности не приходится ждать и без того дефицитных инвестиций, направленных на строительство новых мощностей и перевооружение существующих.

По различным оценкам износ активной части основных фондов на большинстве предприятий превысил 70 %. В эксплуатации находится оборудование со сроком службы более 30 лет, что приводит к снижению коэффициентов использования оборудования, падению рентабельности производства.

В себестоимости цемента одной из наиболее расходных статей являются затраты на электроэнергию, в том числе затраты на измельчение клинкера и добавок, что становится наиболее актуально в условиях постоянно увеличивающихся тарифов на энергоносители.

Традиционно для помола клинкера и добавок используются трубные шаровые мельницы (ТШМ), которые зарекомендовали себя как высокопроизводительный и надежный агрегат.

Основным недостатком трубных мельниц является высокое энергопотребление при низком коэффициенте полезного действия. К тому же высокий физический износ этих агрегатов нередко требует изменения технологического регламента, что снижает эффективность процесса измельчения в мельнице.

В работах [1-8] рассмотрены предложения по повышению эффективности измельчения материалов в трубных шаровых мельницах за счет разрушения застойных зон и интенсификации движения мелющих тел с помощью внутримельничных устройств (ВУ), применения поверхностно-активных веществ.

Повысить эффективность работы агрегата можно также с помощью внутримельничного устройства, схема которого представлена на рисунке 2.

Внутримельничное устройство (ВУ) состоит из трубошнека 1, винтовая поверхность 2 которого имеет навивку обратной направленности вращения барабана мельницы 3. Трубошнек размещен коаксиально барабану мельницы и жестко прикреплен к нему со стороны межкамерной перегородки 4 при помощи стоек 5, а со стороны разгрузочной решетки 6 при помощи лифтеров 7. Лифтеры 7 помимо крепежной выполняют функцию транспортировки загрузки из камеры помола в полость трубошнека. Одним торцом каждый лифтер входит в полость трубошнека и жестко прикреплен к нему, другим жестко

прикреплен к корпусу мельницы. В боковой поверхности лифтера имеется технологическое отверстие 8 для отбора загрузки из камеры помола.

Двухкамерная трубная мельница, оборудованная ВУ работает следующим образом. Измельчаемый материал подается через загрузочную цапфу 9 в камеру 10 грубого помола. При вращении барабана мельницы по мере измельчения материал движется к перегородке 4. Измельченный до некоторой промежуточной тонкости материал проходит через щели в межкамерной перегородке 4 и попадает в камеру 11 тонкого помола, где перемещается в направлении разгрузочной решетки 6. В зоне расположения лифтеров 7 часть материала с мелющими телами (или без них) через отверстия 8 попадает в полость лифтеров 7 и транспортируется с помощью последних в полость трубошнека.

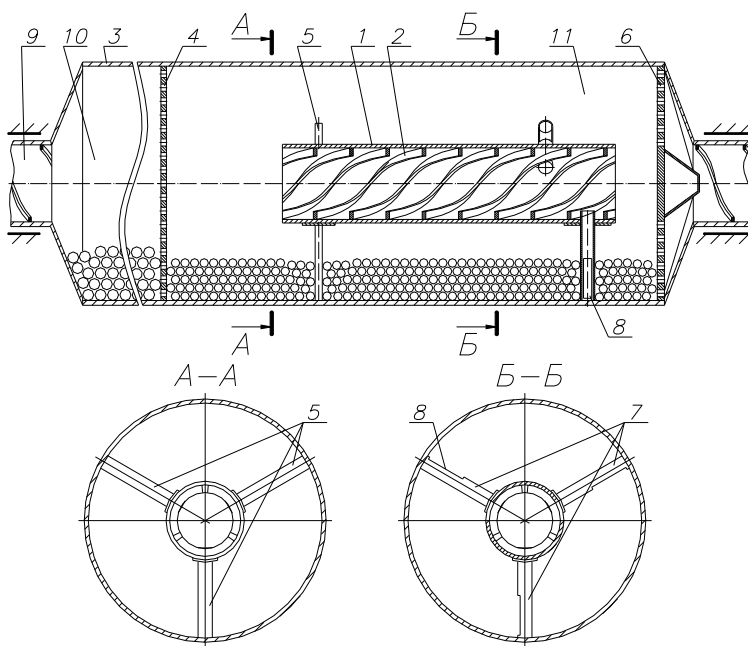


Рисунок 2 – Схема внутримельничного устройства для трубной шаровой мельницы

Под действием винтовой поверхности 2 трубошнека 1 загрузка транспортируется в направлении противоположном направлению продвижения материала в барабане мельницы и возвращается в начало камеры II на повторное измельчение.

В период измельчения материала через мельницу непрерывно просасывается аспирационный воздух со скоростью 0,4 – 0,7 м/с., который подхватывает мелкие частицы материала при пересыпании его из лифтеров в трубошнеки, а также с поверхности транспортируемого слоя загрузки и выносит их к разгрузочной решетке.

Таким образом, устройство позволяет организовать в полости помольного агрегата рециркуляцию части материала, сопровождающуюся процессами классификации и вывода готового продукта из зоны измельчения.

В установившемся режиме расход материала на выходе из мельницы равен расходу на входе в нее.

Продвижение основной части материала вдоль мельницы осуществляется за счет подпора вновь подаваемых порций, часть материала передвигается по средствам потоков аспирируемого воздуха. Поэтому в каждой зоне помольного агрегата массовый поток материала представлен в виде двух составляющих (рис. 3):  $Q_i$  и  $Q_{ai}$ .

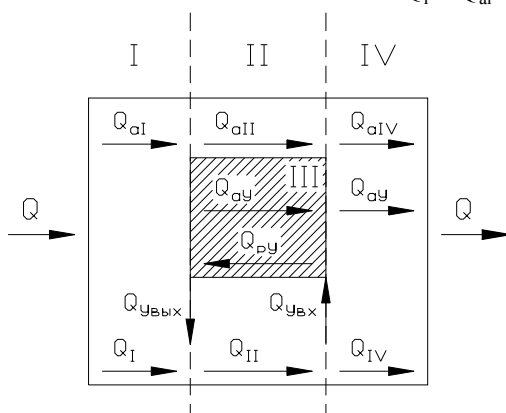


Рисунок 3 – Массовые потоки в трубной шаровой мельнице оборудованной внутримельничным устройством:

$Q_I$ ,  $Q_{II}$ ,  $Q_{IV}$  – потоки материала в среде мелющих тел;  
 $Q_{ai}$ ,  $Q_{aII}$ ,  $Q_{aIV}$  – потоки материала перемещаемого аспирационным воздухом;  
 $Q_{py}$  – поток материала рециркулируемый ВУ;  $Q_{yvx}$ ,  $Q_{yvyx}$  – поток материала на входе и выходе ВУ;  $Q_{ay}$  – поток материала, аспирируемый из ВУ.

При этом, чем выше дисперсность материала, тем процесс пылеуноса протекает более интенсивно. Так как количество «тонких» частиц увеличивается по мере продвижения материала вдоль барабана мельницы, то и объем аспирируемого материала по мере приближения к разгрузочному концу мельницы увеличивается:  $Q_{aI} < Q_{aII} < Q_{aIV}$ .

При переходе в зону расположения ВУ (рис. 3, зона II) массовый поток материала в среде мелющих тел увеличивается на величину расхода материала на выходе из ВУ –  $Q_{y_{\text{ВЫХ}}}$ . При выходе из этой зоны он уменьшается на величину  $Q_{y_{\text{ВХ}}}$ , которая отбирается ВУ из камеры помола.

Внутри трубошнека массовый поток материала в среде мелющих тел направлен в сторону противоположную продвижению материала в камерах помола. Аспирационный поток имеет то же направление, что и в самой мельнице. Объем материала выносимый из трубошнека в камеру помола посредством аспирационного воздуха определяет разницу между  $Q_{y_{\text{ВЫХ}}}$  и  $Q_{y_{\text{ВХ}}}$ .

Вследствие этой разницы из потока материала в среде мелющих тел, при переходе между зонами II и IV, отбирается больше материала, чем добавляется в него, при переходе между зонами I и II. Что приводит к дополнительному снижению расхода материала в среде мелющих тел в зоне IV.

Общий расход материала в зоне IV сохраняется за счет того, что аспирируемый через трубошнек воздух выносит поток  $Q_{aV}$  из зоны III в зону IV, где он продолжает движение смешавшись с основным аспирационным потоком мельницы.

Установка ВУ в последнюю камеру помола ТШМ приводит к изменениям нагрузки на привод мельницы.

Во-первых, увеличивается масса подвижной части мельницы, что приводит к увеличению момента инерции и момента сил трения, возникающих в подшипниковых узлах.

Во-вторых, осуществляется принудительное перемещение загрузки в полости трубошнека, для чего необходимы дополнительные затраты на преодоление сил трения о винтовую поверхность и корпус ВУ.

Процесс подачи загрузки из камеры помола в трубошнек (движение в загрузочных элементах) и прохождение лифтеров сквозь загрузку также сопровождается дополнительными затратами на приводе.

Однако имеются и моменты, снижающие уровень потребляемой

энергии.

Часть загрузки (находящаяся в трубошнеке ВУ) расположена ближе к оси вращения барабана, чем в мельнице классической конструкции вследствие чего снижается крутящий момент, препятствующий вращению барабана.

Таким образом, изменение мощности потребляемой приводом ТШМ связанное с установкой ВУ можно определить по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 - \Delta P_5, \quad (1)$$

где  $\Delta P_1$  – затраты энергии, связанные с изменением потерь на трение в подшипниковых узлах в связи с увеличением массы подвижных частей конструкции ТШМ и снижением массы мелющих тел, кВт;

$\Delta P_2$  – затраты энергии на перемещение загрузки в полости трубошнека ВУ, кВт;

$\Delta P_3$  – затраты энергии на перемещение загрузки в лифтерах, кВт;

$\Delta P_4$  – затраты энергии на преодоление сопротивления загрузки прохождению через неё лифтеров, кВт;

$\Delta P_5$  – экономия энергии, связанная с уменьшением момента сопротивления загрузки вращению барабана ТШМ, кВт.

**Изменение затрат энергии на трение в подшипниковых узлах, связанное с изменением массы подвижной части ТШМ и массы загрузки мелющими телами.**

Работа силы трения прямо пропорциональна величине перемещаемой массы. При установке ВУ увеличивается масса барабана, соответственно увеличиваются и потери на трение. Изменение происходит на величину пропорциональную отношению массы ВУ к массе барабана мельницы.

$$\Delta P_{\text{ХХ}} = 0,1 \cdot k_{\text{МУ}} \cdot D L n,$$

где  $k_{\text{МУ}}$  – коэффициент, равный отношению массы ВУ к массе барабана мельницы, доли ед.

Дополнительные потери мощности с установкой ВУ не изменяются и зависят только от коэффициента загрузки ТШМ мелющими телами.

$$\Delta P_{\text{ДП}} = 0,1 \cdot D_{\text{П}} L_{\text{П}} n \cdot K_{\text{ДП}} \cdot$$

Т.о., изменение величины полных потерь на трение в

подшипниковых узлах определяется изменением потерь холостого хода:

$$\Delta P_1 = 0,1 \cdot k_{MY} \cdot D_{II} L_{II} n. \quad (2)$$

### **Затраты энергии на перемещение загрузки в трубошнеке ВУ**

Затраты на перемещение в трубошнеке определяются как:

$$\Delta P_2 = P_{21} + P_{22} + P_{23} \quad (3)$$

где  $P_{21}$  – затраты на преодоление сил инерции, возникающих при изменении скорости движения загрузки от 0 до  $v_a$ ;

$P_{22}$  – преодоление трения груза о внутреннюю поверхность кожуха;

$P_{23}$  – перемещение груза вдоль оси винта и преодоление трения груза о винтовую поверхность.

После приведения выражений для  $P_{21}, P_{22}, P_{23}$  к виду соответствующему решаемой задаче и системе СИ получены:

$$P_{21} = \frac{Q_{УВЫХ} \cdot v_a^2}{3,6 \cdot 2},$$

где  $Q_{УВЫХ}$  – производительность трубошнека, т/ч;

$v_a$  – абсолютная (осевая) скорость движения загрузки в трубошнеке, м/с;

$$v_a = S \cdot n,$$

где  $S$  – шаг винтовой поверхности трубошнека, м;

$n$  – частота вращения трубошнека (мельницы), об/с;

$$P_{22} = f_k N_k v_{ОТК},$$

где  $v_{ОТК}$  – средняя скорость загрузки относительно поверхности корпуса трубошнека, м/с;

$$v_{ОТК} = \frac{\pi D_{ВК} n}{\cos \alpha},$$

где  $D_{ВК}$  – внутренний диаметр корпуса трубошнека, м;

$\alpha$  – угол подъема винтовой линии по внутреннему диаметру корпуса трубошнека.

$$P_{23} = f_B N_B v_{ОТВ},$$

где  $v_{ОТВ}$  – средняя скорость загрузки относительно винтовой поверхности, м/с;

$$v_{\text{отв}} = \frac{\pi D_{\text{цд}} n}{\cos \alpha_{\text{цд}}},$$

### Мощность, затрачиваемая на перемещение загрузки в лифтерах

При движении в полости лифтера, энергия привода тратится на преодоления сил трения и сил инерции, а также момента относительно оси вращения ТШМ, создаваемого давлением загрузки на поверхность лифтера.

$$\Delta P_3 = (f N_{\text{л}} + m \omega^2 r) \cdot v_r + (m g \cos \varphi - 2 m \omega v_r) \cdot \omega, \quad (4)$$

где  $m$  – масса движущейся в полости лифтера загрузки, кг;

$r$  – радиус размещения центра масс загрузки лифтера относительно оси вращения ТШМ, м;

$v_r$  – скорость относительного движения центра масс загрузки лифтера, м/с;

$\omega$  – угловая скорость вращения ТШМ, рад/с.

На первом участке движения загрузки в полости лифтера  $v_r = 0$  и уравнение (12) принимает вид:

$$\Delta P_{31} = \omega m g \cos \varphi.$$

На втором участке уравнение (12) принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_{32} = & (f m g \cos \varphi - 2 f m \omega v_{r1} + m \omega^2 r_1) \cdot v_{r1} \\ & + (m g \cos \varphi - 2 m \omega v_{r1}) \cdot \omega, \end{aligned}$$

$$v_{r1} = R \cdot \frac{d\xi_1(\varphi)}{d\varphi},$$

$$r_1 = R_{\text{л}} - h_{\text{НАЧ}} - R_{\text{л}} \cdot \xi_1(\varphi).$$

Для третьего участка уравнение (12) принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_{33} = & (f m g \cos \varphi + 2 f m \omega v_{r2} + m \omega^2 r_2) \cdot v_{r2} \\ & + (m g \cos \varphi + 2 m \omega v_{r2}) \cdot \omega, \end{aligned}$$

$$v_{r2} = R_{\text{л}} \cdot \frac{d\xi_2(\varphi)}{d\varphi},$$

$$r_2 = R_{\text{л}} - h_{\text{НАЧ}} - R_{\text{л}} \cdot (\xi_1(\alpha_1) + \xi_2(\varphi)).$$



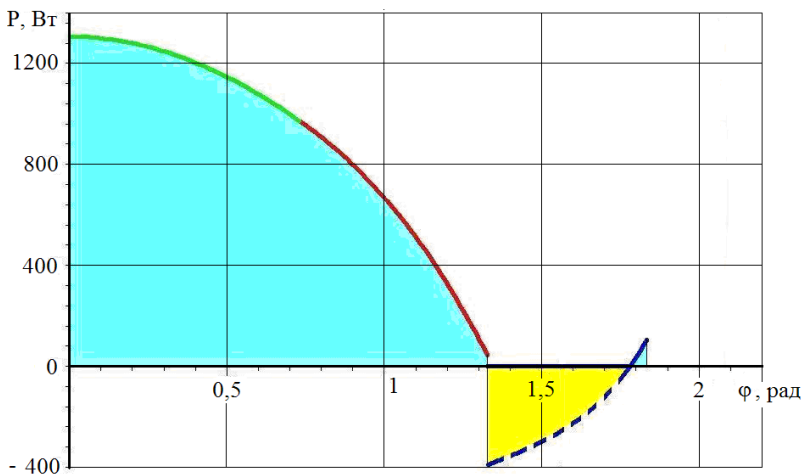


Рисунок 4 – Мощность, затрачиваемая на движение загрузки в полости лифтера

Расчет мощности, согласно уравнения (17) необходимо проводить с учетом вылета части загрузки лифтера из его полости.

На рисунке 4 представлено изменение мощности, потребляемой на движение загрузки в полости лифтера для ТШМ  $\varnothing$  3м. Из графика видно, что мощность, потребляемая на движение загрузки в лифтере принимает максимальное значение в начальный момент движения, когда плечо относительно оси вращения и сила давления загрузки на поверхность лифтера является максимальными. Максимальные затраты составляют не более 1,4 кВт.

В процессе поворота лифтера, мощность, потребляемая на движение загрузки, снижается. При перебросе загрузки на противоположную поверхность лифтера силы давления загрузки на лифтер создают положительный момент относительно оси вращения, т.е. загрузка в лифтере, накопив определенную энергию, способствует вращению ТШМ.

Аналогичное движение загрузки только в другом лифтере повторяется при повороте ТШМ на  $120^\circ$ .

Т.о., мощность, затрачиваемая на движение загрузки в лифтере не превышает 1,5 кВт, что составляет порядка 0,1% от общих энергозатрат ТШМ. В связи с этим, затратами на движение загрузки в полости лифтеров можно пренебречь.

Предварительные, укрупненные расчеты показали, что затраты мощности на преодоление сопротивления загрузки прохождению сквозь нее лифтеров не превышает 1% от общего объема потребляемой мельницей энергии.

### **Изменение затрачиваемой энергии за счет смещения центра тяжести загрузки**

В результате размещения части загрузки в трубошнеке ВУ (5) уменьшается масса загрузки, которая движется в каскадном режиме, а также изменяется плечо равнодействующей силы тяжести относительно оси вращения барабана.

Следствием этого является изменение энергии потребляемой на приведение загрузки в движение.

$$\Delta P_5 = \omega((G_1 + G_2)l_0 - G_1l_1 - G_2l_2), [\text{кВт}], \quad (5)$$

где  $G_1, G_2$  – вес мелющих тел в барабане мельницы до и после установки ВУ, Н;

$l_0$  – плечо силы тяжести загрузки в ТШМ не оборудованной ВУ;

$l_1, l_2$  – плечо силы тяжести относительно оси вращения барабана для соответствующих сил тяжести.

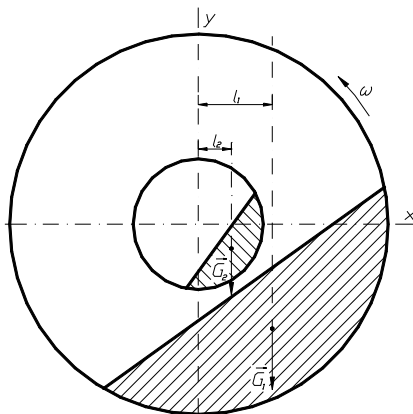


Рисунок 5 – Расположения загрузки в барабане мельницы, оборудованном ВУ

В соответствии с выражениями:

плечо силы тяжести загрузки относительно оси вращения барабана определяется по формуле:

$$l = r_T \cdot \sin \theta = \frac{2 \cdot D_{\Pi}}{6 \cdot \pi \cdot \varphi} \cdot \sin^3 \frac{\Omega}{2} \cdot \sin \theta,$$

где  $r_T$  – радиус расположения центра тяжести загрузки при каскадном режиме движения, м;

$\varphi$  – коэффициент загрузки барабана, доли ед.;

$\Omega$  – центральный угол, соответствующий сегменту загрузки барабана, град;

$\theta$  – угол поворота загрузки относительно вертикали, град.

сила тяжести загрузки камеры тонкого помола:

$$G_2 = V_{\Pi 2} \cdot \varphi \cdot \gamma \cdot g,$$

где  $V_{\Pi 2}$  – полезный объем камеры тонкого помола, м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – плотность загрузки мельницы, т/м<sup>3</sup>.

угловая скорость вращения барабана мельницы:

$$\omega = \psi \cdot \omega_{\text{кр}} = \psi \sqrt{\frac{2g}{D_{\Pi}}},$$

где  $\omega_{\text{кр}}$  – критическая угловая скорость соответствующая критической частоте вращения, рад/с;

$\psi$  – относительная частота вращения барабана.

уравнение (20) принимает вид:

$$\Delta P_3 = AV_{\Pi} \gamma_{\text{MT}} \sqrt{D_{\Pi}} 2\psi \left[ \sin^3 \frac{\Omega_0}{2} \cdot \sin \theta_0 - \sin^3 \frac{\Omega_1}{2} \cdot \sin \theta_1 - \frac{V_{\text{TP}} D_{\text{TP}}}{V_{\Pi} D_{\Pi}} \cdot \sin^3 \frac{\Omega_{\text{TP}}}{2} \cdot \sin \theta_{\text{TP}} \right], \quad (6)$$

где  $A$  – константа С.Е. Андреева,; определяется выражением

$$A = \frac{g \sqrt{2g}}{6\pi} = 2,31 \text{ м}^{1,5} / \text{с}^3$$

$\Omega_{\text{TP}}, \Omega_0, \Omega_1$ , – центральный угол загрузки в трубошнеке, барабане мельницы до и после изменений связанных с установкой ВУ, градусы; определяются выражением

$$\Omega = 206 \cdot (\varphi + 0,374).$$

или 
$$\varphi = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (\Omega - \sin \Omega).$$

$\Theta_{TP}, \Theta_0, \Theta_1$  – соответствующие углы поворота загрузки, градусы; определяются выражением

$$\frac{2}{3f} \sin^3 \frac{\Omega}{2} \sin \Theta = \cos \Theta \left( \sin \frac{\Omega}{2} - \cos^2 \frac{\Omega}{2} \cdot \ln \frac{1 + \sin \frac{\Omega}{2}}{\cos \frac{\Omega}{2}} \right) + \frac{1}{3} \Psi^2 \left[ \Omega - \frac{2}{5} \sin \frac{\Omega}{2} \left( 7 + 6 \cos \frac{\Omega}{2} + 2 \cos^2 \frac{\Omega}{2} \right) \right]$$

В целом предлагаемое внутримельничное устройство трубной шаровой мельницы согласно теоретическому расчету снижает удельный расход электроэнергии на 10-12% при помолу клинкера и добавок.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08042 «р\_офи\_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.*

#### Список литературы:

1. Фадин Ю.М. Расчёт энергии передаваемой шароматериальной загрузке наклонной перегородкой в трубной шаровой мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №4. С. 62-64.
2. Повышение эффективности работы трубных мельниц открытого цикла измельчения / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, С.С. Латышев, Д.В. Богданов, О.Р. Соловьев // Цемент и его применение. 2005. №1. С. 49-53.
3. Определение производительности трубной мельницы, оснащенной внутримельничным классифицирующим устройством / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, С.С. Латышев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №6. С. 98-101.
4. Проблема проектирования технологических комплексов / В.С. Богданов, М.Ю. Ельцов, Ю.М. Фадин, П.А. Хахалев, С.И. Анциферов // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: Материалы Междунар. Науч.-техн. конф., Минск, 26-28 ноября 2014г. Ч.1. С. 210-212.
5. Богданов В.С., Несмеянов Н.П., Богомазов С.Н. Анализ влияния интенсификаторов помола на энергетическую эффективность работы мельницы / Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: Материалы Междунар. Науч.-техн. конф., Минск, 26-28 ноября 2014г. Ч.1. С. 213-

216.

6. Внутримельничные устройства, повышающие эффективность помола в трубных цементных мельницах / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, С.С. Латышев // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: Материалы Междунар. Науч.-техн. конф., Минск, 26-28 ноября 2014 г. Ч.1. С. 217-219.
7. Способ измельчения материалов в трубной мельнице с наклонной межкамерной перегородкой / Ю.М. Фадин, В.Б. Герасименко, О.А. Лапина, А.А. Герасименко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2014. Вып. XIII. С. 334–338.
8. Наклонная межкамерная перегородка / Ю.М. Фадин, С.С. Латышев, Р.В. Донецкий, А.С. Стופןко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2014. Вып. XIII. С. 339–342.