

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія

№ 48 (954) 2012

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2012

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – 170 с.

Державне видання

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);
К.О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А.П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є.І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є.Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;
Ф.Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М.Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;
А.І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В.Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;
В.Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;
В.В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;
П.О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В.Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;
С.І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В.М. КОШЕЛЬНИК, д-р техн. наук, проф.;
В.І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г.В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;
О.К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В.І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.;
П.Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;
М.І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В.Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;
Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; Ю.В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф.;
М.А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: М.І. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Г.М. Шабанова, д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії: В.Л. Авраменко, канд. техн. наук, проф.;

Б.І. Байрачний, д-р техн. наук, проф.; Л.Л. Брагіна, д-р техн. наук, проф.;

Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; Г.І. Гринь, д-р техн. наук, проф.;

А.М. Каратєєв, д-р хім. наук, проф.; М.Ф. Клещев, д-р техн. наук, проф.;

О.Я. Лобойко, д-р техн. наук, проф.; А.С. Савенков, д-р техн. наук, проф.;

Г.Д. Семченко, д-р техн. наук, проф.; С.О. Слобідський, д-р техн. наук, проф.;

Р.Д. Ситнік, д-р техн. наук, проф.; Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

В.І. Тошинський, д-р техн. наук, проф.; В.П. Шапорев, д-р техн. наук, проф.

З номеру 42'2012 Вісник НТУ «ХПІ» має власну подвійну нумерацію: № 42 (948).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 8 від 30 жовтня 2012 р.

А.В. АНЦИФЕРОВ, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ УДАРА В РАСЧЕТЕ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ

Проведено исследование виброударной системы, которая моделирует процесс разрушения виброожиженного слоя материала в вертикальной вибрационной мельнице. Разработана модель из двух масс и помольной камеры с упругими элементами между ними. Рассчитывается время ударного взаимодействия элементов системы. Далее определяется область существования виброударного режима. Предложенный подход дает возможность уточнить отдельные параметры на 15 %.

Вибрационные мельницы в зависимости от ориентации помольной камеры разделяются на горизонтальные и вертикальные – ось камеры расположена вертикально. Рациональным режимом работы для вертикальных вибрационных мельниц (МВВ) является виброударный. При этом кроме эффективного процесса измельчения попутно происходит механоактивация материала. Технологическими параметрами МВВ, определяющими область существования виброударного режима являются амплитуда a , частота ω и зазор Δ внутри помольной камеры между загрузкой и крышкой в состоянии покоя. Так как амплитуда и частота обычно известны, то задача состоит в определении величины Δ , при которой имеет место виброударный режим работы мельницы. Здесь возможны два подхода для динамического расчета МВВ.

В первом внутрикамерная загрузка рассматривается как единичная масса с упруго-вязкими элементами по краям. Этот метод позволяет построить амплитудно-частотную характеристику машины [1].

Второй подход основан на теории виброударных систем [2]. При этом пренебрегается временем удара, что при наличии в камере у днища большого слоя виброожиженного материала может оказаться грубым допущением.

В [3] предложено учесть наличие измельчаемого порошка упругими элементами между соударяемыми телами. Но технологическая загрузка здесь считается единичной массой. Рационально внутреннюю загрузку камеры составлять из двух - трех слоев шаров. Целью данной работы является развитие подхода [3] с учетом наличия двух масс с упругими элементами, которые взаимодействуют с ударником.

© А.В. Анциферов, 2012

Математическая модель. Для решения задачи используем классическую теорию последовательной передачи удара [4].

Рассмотрим ударную систему, состоящую из трех абсолютно жестких элементов, разделенных двумя пружинами.

На рис. 1 показано положение тел перед ударом. Масса m_2 отвечает одному шару из нижнего слоя, а m_3 – результирующая масса шаров верхнего слоя, приходящаяся на m_2 . Соответственно m_1 – масса камеры. Камера совершает гармонические колебания с амплитудой a и частотой ω . Массы m_2 и m_3 неподвижны, а масса m_1 движется со скоростью v_0 – результирующая скорость встречи загрузки с дном камеры.

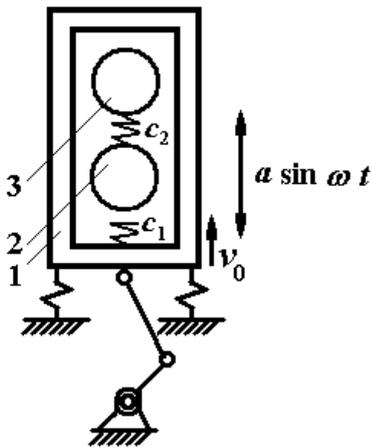


Рис. 1 – Модель системы

Жесткости пружин c_1 и c_2 характеризуют наличие виброожиженного слоя порошка в камере. Плотность его уменьшается по высоте, поэтому $c_1 > c_2$.

Во время удара камеры по массе m_2 между ними возникает сила ударного взаимодействия N_1 , а между массами m_2 и m_3 – сила N_2 . Положительное направление скорости ударника v_0 принимаем вверх. Дифференциальные уравнения движения соударяющихся тел имеют вид:

Закон сохранения количества движения для нашей системы с учетом (3):

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -N_1, \quad m_2 \frac{dv_2}{dt} = N_1 - N_2, \quad m_3 \frac{dv_3}{dt} = N_2. \quad (1)$$

Закон сжатия упругих элементов:

$$N_1 = f_1(\alpha_1) = f_1(x_1 - x_2), \quad N_2 = f_2(\alpha_2) = f_2(x_2 - x_3), \quad (2)$$

где α_i – сжатия упругих элементов; x_i – перемещения масс во время удара.

Из (2) для перемещений масс можно записать:

$$x_1 = x_2 + \alpha_1, \quad x_3 = x_2 - \alpha_2. \quad (3)$$

Закон сохранения количества движения для нашей системы с учетом (3):

$$m_1 v_0 = m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2 + m_3 \dot{x}_3 = m_1 (\dot{x}_2 + \dot{\alpha}_1) + m_2 \dot{x}_2 + m_3 (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_2). \quad (4)$$

Из (4) можно получить выражения для скорости второй массы и далее после дифференцирования (3) выражения для мгновенных скоростей для масс m_1 и m_3 . Дифференцируя их еще раз по времени находим ускорения тел во время удара:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1 &= [(m_2 + m_3)\ddot{\alpha}_1 + m_3\ddot{\alpha}_2] / M, \\ \ddot{x}_2 &= [-m_1\ddot{\alpha}_1 + m_3\ddot{\alpha}_2] / M, \\ \ddot{x}_3 &= -[m_1\ddot{\alpha}_1 + (m_1 + m_2)\ddot{\alpha}_2] / M,\end{aligned}\tag{5}$$

где M – общая масса системы.

Подставим (5) в первое и третье уравнения (1) и с учетом (2) получим:

$$\begin{aligned}\frac{m_1(m_2 + m_3)}{M}\ddot{\alpha}_1 + \frac{m_1m_3}{M}\ddot{\alpha}_2 &= -f_1(\alpha_1), \\ \frac{m_1m_2}{M}\ddot{\alpha}_1 + \frac{m_3(m_1 + m_2)}{M}\ddot{\alpha}_2 &= -f_2(\alpha_2).\end{aligned}\tag{6}$$

Начальные условия для системы (6) при $t = 0$

$$x_1 = x_2 = x_3 = \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = \alpha_1 = \alpha_2 = \dot{\alpha}_2 = 0, \quad \dot{x}_1 = \dot{\alpha}_1 = v_0.\tag{7}$$

Решение уравнений (6) зависит от вида силовой функции упругих элементов. Наиболее простым является случай, когда зависимости носят линейный характер $N_1 = c_1\alpha_1$ и $N_2 = c_2\alpha_2$. Тогда система (6) с учетом (2) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned}A\ddot{\alpha}_1 + B\ddot{\alpha}_2 &= -\alpha_1, \\ B\ddot{\alpha}_1 + \Gamma\ddot{\alpha}_2 &= -\alpha_2,\end{aligned}\tag{8}$$

где $A = \frac{m_1(m_2 + m_3)}{c_1M}$, $B = \frac{m_1m_3}{c_1M}$, $B = \frac{m_1m_2}{c_2M}$, $\Gamma = \frac{m_3(m_1 + m_2)}{c_2M}$.

Решение системы (8) ищем в виде:

$$\alpha_1 = g_1 \sin(\omega t + \beta), \quad \alpha_2 = g_2 \sin(\omega t + \beta).\tag{9}$$

Дифференцируя (9) и подставив в (8) получаем систему алгебраических уравнений из решения которой получаем два соотношения:

$$g_2/g_1 = B\omega^2/(1-\Gamma\omega^2) = (1-A\omega^2)/B\omega^2. \quad (10)$$

Приравнивая эти выражения после преобразований получим частотное уравнение:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{c_1 c_2 M}{2m_1 m_2 m_3} \left[(A + \Gamma) \pm \sqrt{(A - \Gamma)^2 + 4BB} \right]. \quad (11)$$

Эти два значения частоты отвечают соответственно двум значениям отношений амплитуд:

$$\mu_1 = g_{21}/g_{11}, \quad \mu_2 = g_{22}/g_{12}. \quad (10)$$

Полученные решения для α_1 и α_2 в (9) являются частными. Общими решениями являются выражения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= g_{11} \sin(\omega_1 t + \beta_1) + g_{12} \sin(\omega_2 t + \beta_2), \\ \alpha_2 &= g_{21} \sin(\omega_1 t + \beta_1) + g_{22} \sin(\omega_2 t + \beta_2). \end{aligned} \quad (11)$$

Неизвестные g_{11} , g_{12} , β_1 , β_2 находим из начальных условий (7). После их подстановки в (11) получаем:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{v_0}{\mu_2 - \mu_1} \left(\frac{\mu_2}{\omega_1} \sin \omega_1 t - \frac{\mu_1}{\omega_2} \sin \omega_2 t \right), \\ \alpha_2 &= \frac{\mu_1 \mu_2 v_0}{\mu_2 - \mu_1} (\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t). \end{aligned} \quad (12)$$

Производные от этих выражений дают скорости изменения сжатия упругих элементов. Тогда из (4) получим выражение для скорости второй массы и подставив в (3) после их дифференцирования получим выражения для скоростей масс m_1 и m_3 .

Перемещения тел во время удара определяются из выражений:

$$x_i = \int_0^t \dot{x}_i dt. \quad (13)$$

В момент окончания удара, так же как и в момент начала, сила и сжатие упругого элемента равна нулю. После подстановки в первое уравнение (12)

t_1 , а во второе – t_2 и приравняв их нулю, получим тригонометрические выражения для их определения. После подстановки найденных значений времени в выражения скорости и перемещения тел найдем скорости тел после удара и их перемещения за время удара.

Вторая фаза расчета заключается в использовании методики расчета [2, 3] по теории виброударных систем, но с учетом времени взаимодействия элементов. При этом $t_1 > t_2$ (из принятого условия $c_1 > c_2$), поэтому в расчетах учитываем только t_1 . Кроме того при движении от днища к крышке, удар о крышку и движении обратно две массы уже рассматриваются как единая.

Временем удара о крышку пренебрегаем согласно опытными данным [5].

Расчетная схема представлена на рис. 2. Координаты средних точек камеры и массы Y и y соответственно. Отсчет ведем от среднего положения камеры.

Начало отсчета времени принимаем в точке 0, в момент соударения загрузки с днищем камеры.

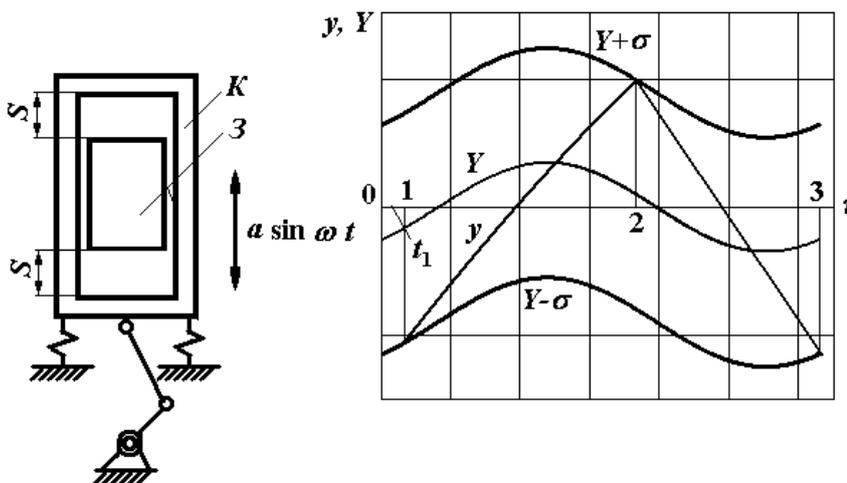


Рис. 2 – Расчетная схема

Зазор между загрузкой и крышкой камеры в статическом положении $2S$.

Задачу решаем в безразмерных величинах, для чего принимаем следующие обозначения (звездочки при величинах показывают то, что они размерные):

$$y = \frac{\omega^2}{g} y^*, Y = \frac{\omega^2}{g} Y^*, \Gamma = \frac{a\omega^2}{g}, \tau = \omega t, \sigma = \frac{\omega^2}{g} S. \quad (14)$$

Пример расчета. Рассмотрим один период движения камеры и массы при следующих параметрах: $R_d = 0,6$; $R_k = 0,35$; $\Gamma = 7$. Для различных значений фазового угла φ определялись значения σ и результирующая скорость удара $v_{уд}$ о днище.

Данные представлены на рис. 3.

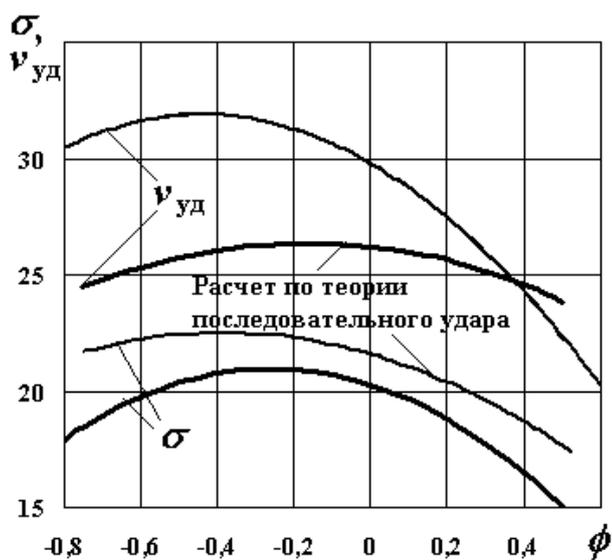


Рис. 3 – Результаты расчета

Выводы. Использование теории последовательной передачи удара дает уточнение в определении зазора до 3 % и в определении скорости удара до 15 %. При этом диапазон существования виброударного режима сузился, а экстремум полученных кривых получился не ярко выраженным.

В качестве дальнейших задач исследования необходимо продолжить экспериментальные исследования по подтверждению полученных зависимостей.

В теоретическом плане необходимо рассмотреть трехмассную систему и влияние ее на время ударного взаимодействия.

Список литературы: 1. Техника и технология обогащения руд / [под ред. В.Н. Потукаев, Д.К. Крюков, А.Г. Червоненко и др.]. – М.: Недра, 1975. – 240 с. 2. Анциферов А.В. Расчет технологических режимов вертикальной вибрационной мельницы / А.В. Анциферов, Д.И. Драбан // Вибрации в технике и технологиях. – 2011. – № 2 (62). – С. 59 – 60. 4. Александров Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. – М.: «Наука», 1969. – 197 с. 5. Анциферов А.В. Экспериментальное исследование соударения тел через слой порошкового материала / А.В. Анциферов, И.В. Комарова // Вісник НТУ «ХП». – 2010. – № 66. – С. 58 – 63.

Поступила в редколлегию 12.10.2012

УДК 531-531.3

Использование теории последовательной передачи удара в расчете виброударной системы / А.В. АНЦИФЕРОВ // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серия: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 3 – 9. – Бібліогр.: 5 назв.

Проведено дослідження віброударної системи, що моделює процес руйнування віброзрідженого шару матеріалу у вертикальному вібраційному млині. Розроблена модель з двох мас та молочної камери з пружними елементами між ними. Розраховується час ударної взаємодії елементів даної системи. Далі визначається область існування віброударного режиму. Запропонований підхід дає можливість уточнити окремі параметри на 15 %.

The research of the vibroshock system which designs the process of destruction of the vibrofluidized layer of material in a vertical oscillation mill, is conducted. The model is developed from two masses and chamber with resilient elements between them. Time of shock co-operation of elements of the system

settles accounts. The area of existence of the vibroshock mode is further determined. Taking in to consideration impact time gives the possibility to specify some parameters on 15 %.

УДК 622.776

И.В. АХМЕТШИНА, инж., ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск,
И.К. МЛАДЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф.,
ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск

ПРИНЦИП ЭКОНОМИЧНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СЕПАРАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО БЛОКА

На основании закона построения технологических схем найдена зависимость сепарационной характеристики схемы от порядка следования сепараторов с различными разделительными свойствами.

Введение. Наиболее емкой системной характеристикой разделительного аппарата является сепарационная характеристика, которая отражает вероятности перехода узких фракций подготовленного полезного ископаемого в обогащенный продукт. Это при условии, если разделение бинарное. В случае же многомерного разделения аппарат имеет столько сепарационных характеристик, сколько продуктов на нем получают. Однако, наиболее устойчивое разделение – бинарное, поэтому будем рассматривать и аппараты, и технологические блоки, осуществляющие упомянутый способ разделения.

Постановка задачи. При создании конструкции сепаратора заранее, как правило, не могут определить его технологические свойства, поэтому сепарационную характеристику получают экспериментально. На этом основании полагаем, что аппарат полностью характеризуется сепарационной характеристикой. При чем обычно аппарат не в состоянии обеспечить требуемые технологические показатели. Для достижения же таких показателей применяют различные типы соединений аппаратов. В результате получают технологический разделительный блок. Сепарационная характеристика такого блока, как правило, является «лучшей» по сравнению с отдельным аппаратом.

© И.В. Ахметшина, И.К. Младецкий, 2012

«Лучше» – это значит, что она имеет бóльшую крутизну в точке перегиба и смещена вдоль оси абсцисс настолько, чтобы обеспечить или бóльшее качество концентрата (вправо) или малые потери ценного минерала в хвостах (влево).

Сепараторы, как правило, достаточно дорогостоящие аппараты. И чем «лучше» сепарационная характеристика, тем дороже сепаратор. Поэтому технологический блок разделения получается достаточно дорогим технологическим решением. Рассмотрим один из способов экономичного формирования технологического блока.

Математическая модель. В работах [1, 2] описан способ управления сепарационными характеристиками схем соединения разделительных аппаратов, основанный на последовательном разделении и смешении продуктов разделения с близкими показателями разделительного признака. Если в такой схеме подсчитать количество потоков, смешивающихся в каждой точке смешения, то получим числа, соответствующие треугольнику Паскаля (рис. 1). Эти числа поставлены между перечистными аппаратами схемы.

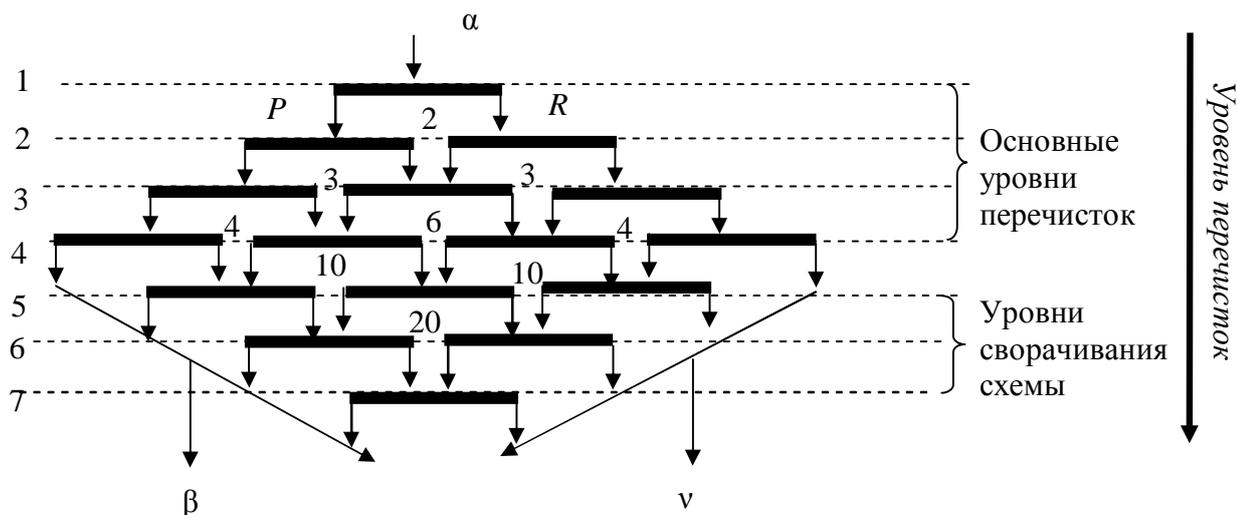


Рис. 1 – Симметричная схема разделения, построенная по принципу треугольника Паскаля с 4-мя основными уровнями перечисток

Данная схема является симметричной как относительно среднего уровня перечисток, так и относительно вертикальной оси. Поэтому назовем ее симметричной схемой разделения. Здесь a , b и n – это содержание ценного минерала в исходном, обогащенном и обедненном продуктах.

Такая схема позволяет «улучшить» сепарационную характеристику, т.е. повысить крутизну в точке перегиба, снизить вероятность извлечения бедных сростков, практически до нуля, повысить вероятность извлечения богатых

сростков. Такое «улучшение» повышает селективность разделения.

Обозначим вероятность извлечения частицы с заданными свойствами в обогащенный продукт в одном акте разделения P , а вероятность извлечения ее в обедненный – R .

Для симметричных схем соединения сепараторов с одинаковыми сепарационными характеристиками вероятности извлечения частицы в обогащенный продукт на выходе из схемы будут определяться выражениями:

- для 2-х основных перечисток:

$$P_{cx2} = P^2 + 2 \cdot P^2 R; \quad (1)$$

- для 3-х основных перечисток:

$$P_{cx3} = P^3 + 3 \cdot P^3 R + 6 \cdot P^3 R^2; \quad (2)$$

- для 4-х основных перечисток:

$$P_{cx4} = P^4 + 4 \cdot P^4 R + 10 \cdot P^4 R^2 + 20 \cdot P^4 R^3. \quad (3)$$

Рассмотрим теперь случай, когда на каждом уровне перечистки находятся сепараторы с одинаковой сепарационной характеристикой, но в каждом уровне сепараторы имеют свою P_i , отличную от других уровней, сепарационную характеристику. В этом случае выражения для вероятностей извлечения частицы в обогащенный продукт после прохождения всей схемы будут определяться из выражений:

- для 2-х основных перечисток:

$$P_{cx2} = P_1 P_2 + P_1 R_2 P_3 + R_1 P_2 P_3; \quad (4)$$

- для 3-х основных перечисток:

$$P_{cx3} = P_1 P_2 P_3 + P_4 (P_1 P_2 R_3 + P_1 R_2 P_3 + R_1 P_2 P_3) + R_4 P_5 (P_1 P_2 R_3 + P_1 R_2 P_3 + R_1 P_2 P_3) + P_4 P_5 (P_1 R_2 R_3 + R_1 P_2 R_3 + R_1 R_2 P_3). \quad (5)$$

Для 4-х основных перечисток получаем сумму произведений вероятностей: 1 слагаемое степени P^4 , 4 слагаемых степени $P^4 R$, 10 слагаемых степени $P^4 R^2$ и 20 слагаемых степени $P^4 R^3$.

На рис. 2 показаны сепарационные характеристики 5-ти применяемых аппаратов P_1 – характеристика 1-го уровня перечисток, характеристика

P_2 – аппаратов 2-го уровня перечисток, характеристики P_3, P_4, P_5 – соответственно 3-го, 4-го и 5-го уровней перечисток. Характеристика S – для всего технологического блока, составленного по упомянутой симметричной схеме.

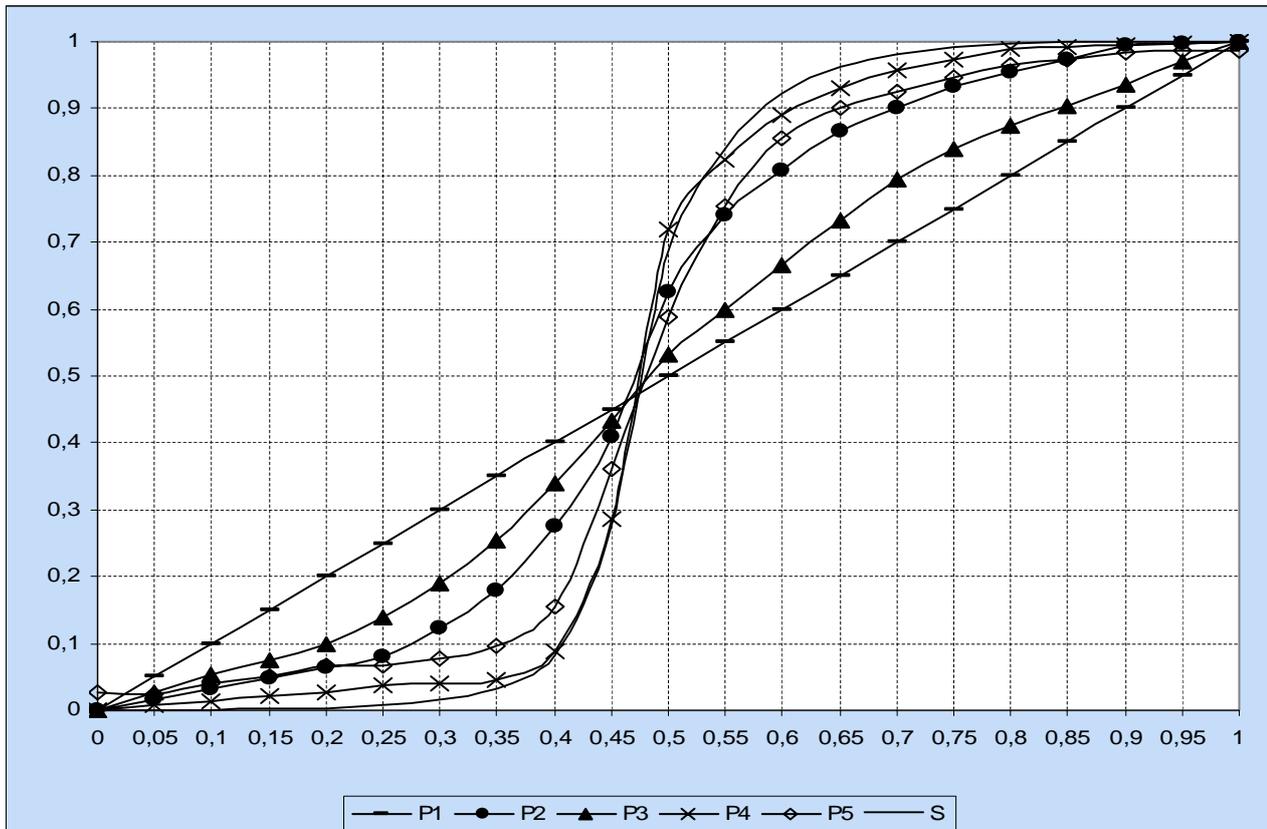


Рис. 2 – Сепарационные характеристики отдельных разделительных аппаратов и результирующая сепарационная характеристика схемы с 3-мя основными перечистками

Как видно из этого рисунка результирующая сепарационная характеристика схемы с 3-мя основными перечистками (S) «лучше» любой из характеристик сепараторов входящих в данную схему – она характеризуется большей крутизной в линии перегиба, более низкими значениями вероятности извлечения в обогащенный продукт бедных сростков и более высокими – богатых. Таким образом, использование данной схемы соединения аппаратов позволяет получить более точное разделение материала, чем это возможно для любого отдельного сепаратора.

Здесь следует обратить внимание на то, что поскольку нами используется принцип «сворачивания» схемы, то количество сепараторов в каждом уровне перечистки на этапе сворачивания убывает, и последний уровень состоит только из одного сепаратора. При этом производительность этого, последнего, сепаратора может быть ниже, чем производительность других сепараторов в схеме, по крайней мере, ниже, чем у сепаратора 1-го уровня, по-

сколькx в процессе разделения происходит стадияльное выделение и выведение из процесса обогащенного и обедненного продуктов. Уменьшение производительности от уровня к уровню зависит от раскрытия ценного минерала и от a .

Покажем на примере формирование результирующей сепарационной характеристики схемы. Для этого рассмотрим симметричную схему с 3-мя основными уровнями перемещений:

$$P_{cx} = P_1P_2P_3 + P_4(P_1P_2R_3 + P_1R_2P_3 + R_1P_2P_3) + R_4P_5(P_1P_2R_3 + P_1R_2P_3 + R_1P_2P_3) + P_4P_5(P_1R_2R_3 + R_1P_2R_3 + R_1R_2P_3). \quad (6)$$

Заменим R на $(1 - P)$. Тогда имеем:

$$P_{cx} = [P_1 P_2 P_3 + P_1 P_2 P_4 (1 - P_3) + P_1 P_3 P_4 (1 - P_2) + P_2 P_3 P_4 (1 - P_1)] + [P_1 P_2 P_5 (1 - P_3) (1 - P_4) + P_1 P_3 P_5 (1 - P_2) (1 - P_4) + P_2 P_3 P_5 (1 - P_1) (1 - P_4)] + [P_1 P_4 P_5 (1 - P_2) (1 - P_3) + P_2 P_4 P_5 (1 - P_1) (1 - P_3) + P_3 P_4 P_5 (1 - P_1) (1 - P_2)]. \quad (7)$$

Раскроем скобки и проведем соответствующие преобразования:

$$P_{cx} = [P_1P_2P_3 + P_1P_2P_4 - P_1P_2P_3P_4 + P_1P_3P_4 - P_1P_2P_3P_4 + P_2P_3P_4 - P_1P_2P_3P_4] + [P_1P_2P_5(1 - P_3 - P_4 + P_3P_4) + P_1P_3P_5(1 - P_2 - P_4 + P_2P_4) + P_2P_3P_5(1 - P_1 - P_4 + P_1P_4)] + [P_1P_4P_5(1 - P_1 - P_2 + P_1P_2) + P_2P_4P_5(1 - P_1 - P_3 + P_1P_3) + P_3P_4P_5(1 - P_1 - P_2 + P_1P_2)]. \quad (8)$$

В результате:

$$P_{cx} = (P_1P_2P_3 + P_1P_2P_4 + P_1P_3P_4 + P_2P_3P_4 + P_1P_2P_5 + P_1P_3P_5 + P_2P_3P_5 + P_1P_4P_5 + P_2P_4P_5 + P_3P_4P_5) + 6P_1P_2P_3P_4P_5 - 3(P_1P_2P_3P_4 + P_1P_2P_3P_5 + P_1P_2P_4P_5 + P_1P_3P_4P_5 + P_2P_3P_4P_5). \quad (9)$$

Выводы.

Полученное выражение представляет собой сумму произведений вероятностей всех возможных комбинаций вероятностей используемых в схеме сепараторов (в данном случае, по 3 из 5-ти, по 4 из 5-ти и по 5 из 5-ти).

Нами принята нумерация сепарационных характеристик сверху вниз и от худшего к лучшему сепаратору.

Если мы изменим порядок следования сепараторов, например, от «лучшего» к «худшему» или же они будут идти в случайном порядке, результи-

рующее выражения для сепарационной характеристики схемы останется неизменным.

Таким образом, порядок следования сепараторов в схеме является несущественным и чем меньше дорогих сепараторов в схеме, тем она экономичнее без ухудшения ее технологических свойств.

Целесообразно делать линией с «наилучшей» характеристикой последнюю линию, состоящую из 1-го сепаратора с относительно небольшой производительностью, поскольку часть материала уже выведена из процесса на предыдущих этапах перечистки.

Результирующая сепарационная характеристика схемы определяется 1-м наилучшим сепаратором, причем она имеет более высокую крутизну и более низкие вероятности извлечения бедных сростков и более высокие для богатых сростков, чем характеристики «наилучшего» сепаратора схемы.

Таким образом, для достижения одного и того же эффекта в схеме можно применять меньшее количество «лучших», то есть, как правило, более дорогих сепараторов, разместив их в линии, где число сепараторов наименьшее.

Список литературы: 1. Младецкий И.К. Формирование сепарационных характеристик разделительных блоков / [И.К. Младецкий, И.В. Ахметшина, Ю.С. Мостика и др.] // Збагачення корисних копалин. – 2007. – № 29-30. – С. 20 – 25. 2. Младецкий И.К. Принцип построения гибких характеристик сепарационных разделительных блоков / [И.К. Младецкий, И.В. Ахметшина, Ю.С. Мостика и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». – 2007. – № 26. – С. 119 – 123.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 622.776

Принцип экономичного формирования сепарационной характеристики технологического разделительного блока / И.В. АХМЕТШИНА, И.К. МЛАДЕЦКИЙ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 9 – 14. – Бібліогр.: 2 назв.

На основі закону побудови технологічних схем знайдена залежність сепараційної характеристики схеми від порядку слідування сепараторів з різними сепараційними характеристиками.

Scheme separating characteristic dependence on arrangement of separations with different characteristics based on technological schemes building rules is founded.

А.В. БАШТА, канд. техн. наук, доц., НУПТ, Киев

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ

Приведены результаты исследований твердости и трещиностойкости поверхности образцов конструкционной керамики методом индентирования. По результатам исследований, для характеристики механической прочности поверхности хрупких материалов, предлагается использовать кривую повреждаемости, которая показывает как изменяется величина отношения H_v / K_{1c} от длины трещины индентирования.

Постановка проблемы исследования. Механические характеристики керамики в настоящее время практически в одинаковой мере интересуют различные области деятельности человека. Уникальные особенности этого типа материалов позволяют все более широко применять их в народном хозяйстве, в том числе в пищевой и перерабатывающей промышленности. Высокая твердость и износостойкость изделий из керамики, при низком взаимодействии с окислительными и агрессивными средами, делает их незаменимыми также и в ортопедической хирургии медицины.

Анализ последних достижений и публикаций позволяет отметить особое внимание к вопросам, связанным с определением физико-механических свойств керамических материалов как у нас в стране [1, 2] так и за рубежом [3, 4]. Однако отсутствие единой методологии оценки этих характеристик, широкий диапазон нагрузок, при которых проводятся испытания, довольно большой набор полуэмпирических зависимостей для определения их значений, а также не всегда полный и точный учет особенностей механизмов деформирования и разрушения приводит к тому, что даже для одного и того же материала расхождения в данных могут достигать 60 % и больше [5].

Цель работы. Комплексное исследование характеристик прочности керамики при индентировании пирамидой Виккерса и определение особенностей изменения значений ее твердости и трещиностойкости приповерхностных слоев в зависимости от прилагаемой нагрузки.

Методика исследования. Для работы были отобраны (табл. 1) два ма-

териалы на основе спеченного нитрида кремния (НК-1 и НК-2) с размером зерна 4...10 мкм, полученные по различным технологиям.

Один горячепрессованный карбид кремния (КК-1) с размером зерен до 20 мкм.

А также два материала на основе диоксида циркония с различным процентным содержанием стабилизирующих добавок оксида иттрия (3 % Y_2O – ДЦИ-1 и 2,5 % Y_2O – ДЦИ-2) и размером зерен 3...5 мкм.

Таблица 1 – Исследуемые материалы и их физико-механические характеристик

№ п/п	Материал	Плотность, г/см ³	$E_{ст}$, ГПа	$E_{дин}$, ГПа	σ_B , МПа	Предел деформации, $\times 10^{-4}$ м/м	Мера хрупкости
1	НК-1	3,27	325	314	658	20,2	1,0
2	НК-2	3,29	296	284	531	17,9	1,0
3	КК-1	3,24	319	313	357	11,2	1,0
4	ДЦИ-1	6,02	201	222	310	15,4	1,0
5	ДЦИ-2	5,79	202	217	272	13,4	1,0

Известны [6, 7] различные методики определения характеристик прочности хрупких конструкционных материалов.

Данные исследования проводили на испытательной машине 1958УІ-10 с использованием модернизированного блока для испытаний керамики на изгиб, снабженного алмазным индентором Виккерса.

Более подробно методика испытаний описана в работе [8].

Определение коэффициента K_{Ic} (1) осуществляли по полуэмпирической зависимости Ниихары, как наиболее соответствующей для расчетов коэффициента трещиностойкости в такого рода материалах [10].

$$K_{Ic} = 0,203a^2 \cdot H_v \cdot c^{-3/2}, \quad (1)$$

где a – полу диагональ отпечатка идентора; H_v – твердость материала; c – длина радиальной трещины.

Твердость при индентировании пирамидой Виккерса поверхности исследуемого материала определяли по известной зависимости (2):

$$H_v = 436,6 \cdot F \cdot a^{-2}, \quad (2)$$

где F – действующая на индентор нагрузка.

Основные результаты испытаний и их обсуждение. Определение твердости и трещиностойкости поверхностных слоев материалов представлены в виде зависимостей их значений от длины диагонали отпечатка или длины трещин, формирующихся в его углах.

На рис. 1 показаны зависимости изменения твердости исследуемых материалов от длины диагонали отпечатка.

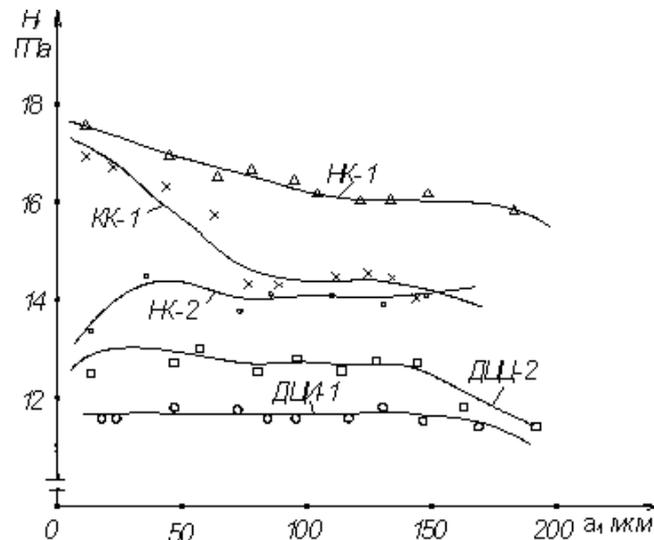


Рис. 1 – Зависимость значений твердости от длины диагонали отпечатка индентора

Величина твердости на участках стабилизации поведения кривых изменяется от 10 до 17 ГПа. При этом на начальных участках, которые соответствуют этапу перехода от нагрузок микротвердости ($F \leq 10H$) к твердости ($F > 10H$), это различие и того больше.

Следует также отметить, что на этом этапе нагружения поведение большинства материалов заметно отличается друг от друга.

Так для материалов ДЦИ-1, ДЦИ-2 и НК-2 происходит увеличение значений H_v и наоборот – для НК-1 и КК-1 заметное их уменьшение, на достаточно продолжительном диапазоне (5...500 Н) действующих нагрузок.

Такой же по характеру поведения участок кривой наблюдается и на диаграмме, отражающей трещиностойкость приповерхностных слоев исследуемых материалов.

На рис. 2 показано изменение значений K_{Ic} на достаточно большом отрезке увеличения длины трещины идентификации. Как и в случае с твердостью поверхности материалов, на диаграмме трещиностойкости наглядно прослеживается область (от нуля приблизительно, до 150 мкм), в которой значения K_{Ic} претерпевают наибольшие изменения.

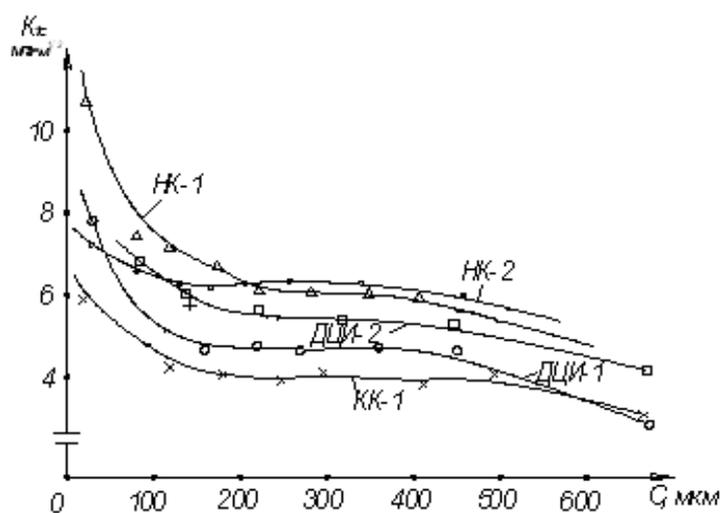


Рис. 2 – Зависимость значений K_{1c} от длины радиальной трещины индентирования

Чаще всего это носит ярко выраженный ниспадающий характер. После чего наступает замедление падения величины значений K_{1c} с последующей, как отмечалось выше, её стабилизацией. Данный участок стабилизации значений на диаграмме, характеризующей изменение величины K_{1c} от длины трещины, является более продолжительным (150...450 мкм) по сравнению с аналогичным участком неизменяемости величины значений кривых твердости, приведенных на рис. 1. При дальнейшем увеличении нагрузки, индентирования, как показывают экспериментальные исследования, снова наблюдается падение значений K_{1c} .

Известно [11], что эти характеристики взаимосвязаны между собой и, как уже отмечалось, их отношение определяет способность материала противостоять механическим повреждениям его поверхности, а для изделий из керамики это в большинстве случаев является определяющим их разрушение.

Поскольку, при любом нагружении конструкционного элемента, зарождение и развитие трещины в условиях эксплуатации происходит на его поверхности.

Поэтому кривую, характеризующую изменение отношения H_v / K_{1c} от длины трещины или величины действующей нагрузки, целесообразно назвать «диаграммой повреждаемости поверхности керамики». В дальнейшем, для краткости, – «диаграммой повреждаемости».

На рис. 3 приведены кривые повреждаемости, показывающие зависимость отношения H_v / K_{1c} от величины дефекта (в нашем случае трещина индентирования) в материале. Обращает на себя внимание участок диаграммы контролируемого увеличения или равномерного «подростания» длины тре-

щины, где, вероятно, уравниваются действия механизмов деформирования и разрушения при indentировании способностью материала противостоять их развитию.

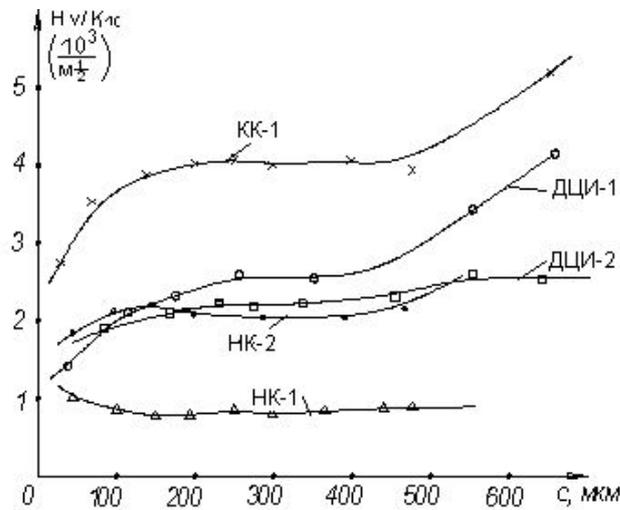


Рис. 3 – Изменение кривых характеризующих повреждаемость поверхности керамических материалов при indentировании

Для всех исследуемых в работе керамических материалов определены такие участки на диаграммах повреждаемости. Они практически параллельны по отношению к оси абсцисс.

Продолжительность этих участков кривых (если по оси абсцисс откладывают длину трещины) различна и составляет 100...450 мкм.

Вызывает интерес определение значений величины твердости и коэффициента интенсивности напряжений на участке неизменяемости их отношения на диаграмме повреждаемости поверхности материала.

В табл. 2 приведены усредненные значения этих величин при длине трещины 200...400 мкм.

Таблица 2 – Усредненные данные экспериментальных исследований

Материал	Нагрузка F , Н	Длина полудиоанали отпечатка a , мкм	Длина трещины l^* , мкм	Твердость H_v , ГПа	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	H_v / K_{1c} , $10^3 / м^{1/2}$
НК-1	400	11,2	226,1	15,3	6,1	2,51
НК-2	400	116,8	215,0	13,6	6,2	2,19
КК-1	200	80,8	220,8	14,2	3,6	3,95
ДЦИ-1	300	111,4	237,8	11,3	4,1	2,76
ДЦИ-2	300	104,6	208,6	12,7	5,1	2,49

l^* – длина трещины от угла отпечатка (основания) до ее вершины

Учитывая же постоянство этих характеристик на достаточно продолжительном, как отмечалось выше, участке установившегося подрастания длины трещины, вероятно, следует предположить наиболее близкое соответствие полученных значений твердости и трещиностойкости истинным величинам исследуемых материалов.

Анализ полученных экспериментальных результатов указывает на тесную взаимосвязь между плотностью, дисперсностью, модулем упругости и пределом прочности, твердостью, трещиностойкостью исследуемых материалов. Чем выше плотность, тем больше величина упругости, предел прочности (НК-1 и НК-2, табл. 1 и 2). С увеличением размеров зерен или структурных частиц материала, как правило, снижается его трещиностойкость и наблюдается падение предела прочности.

Так, карбид кремния (КК-1, табл. 2) при достаточно высокой плотности, модуле упругости и твердости, имеет относительно низкую деформативность и трещиностойкость ($K_{Ic} = 3,6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), а также предел прочности ($\sigma_b = 357 \text{ МПа}$). Нитрид кремния (НК-1) с размером зерен почти в два раза меньшим, чем у карбид кремния (КК-1), при практически равных значениях плотности, но с заметно более высокой деформативностью и более высоким значением K_{Ic} , имеет чуть ли не в два раза выше предел прочности.

В то же время для одного и того же типа материалов (диоксид циркония) заметная разность в значениях плотности, дисперсности, модуле упругости, при практически равной деформативности, трещиностойкости, и твердости, не существенно сказывается на его повреждаемости.

Отмечая выше обсуждавшиеся физико-механические характеристики, нельзя не остановиться на особенностях процессов деформирования и разрушения, происходящих при indentировании изучавшейся керамики.

На рис. 4 приведены некоторые характерные виды деформирования и разрушения оксидной (а, б) и нитридкремниевой (в, г) керамики.

В значительной мере отличительные особенности реакции материала на внедрение индентора становятся заметны после повторного полирования его поверхности.

Так, для керамики НК-2, содержащей мелкодисперсную стеклофазу, под индентором образуется достаточно глубинная (во многом превышающая глубину самого отпечатка) зона микроразрушений (рис. 4 г). В то время как для диоксидциркониевой керамики, при нагрузках до 600 Н, видимых изменений под индентором в материале не наблюдается (рис. 4 б).

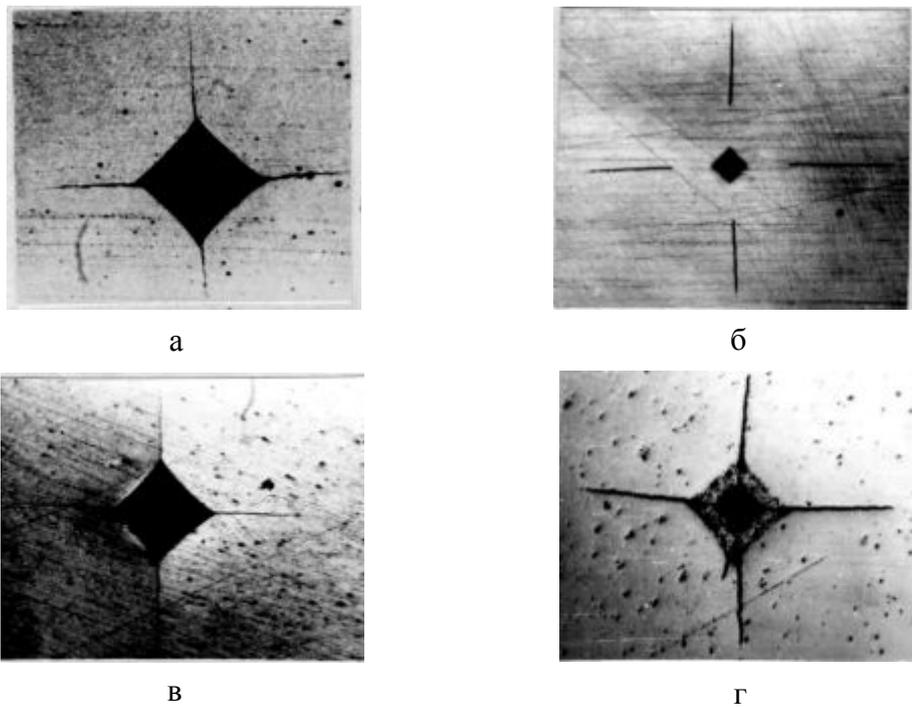


Рис. 4 – Характерные виды отпечатков индентора и трещин в керамике:
 а, в – сразу после индентирования; б, г – после повторного полирования;
 а, б – диоксид циркония частично стабилизированный окисью иттрия;
 в, г – нитрид кремния

На рис. 5 показаны форма и зона микро разрушений под индентером, образующая в совокупности практически классическую радиальную трещину, характерную для таких однородных материалов как стекло, кварц, алмаз и им подобные

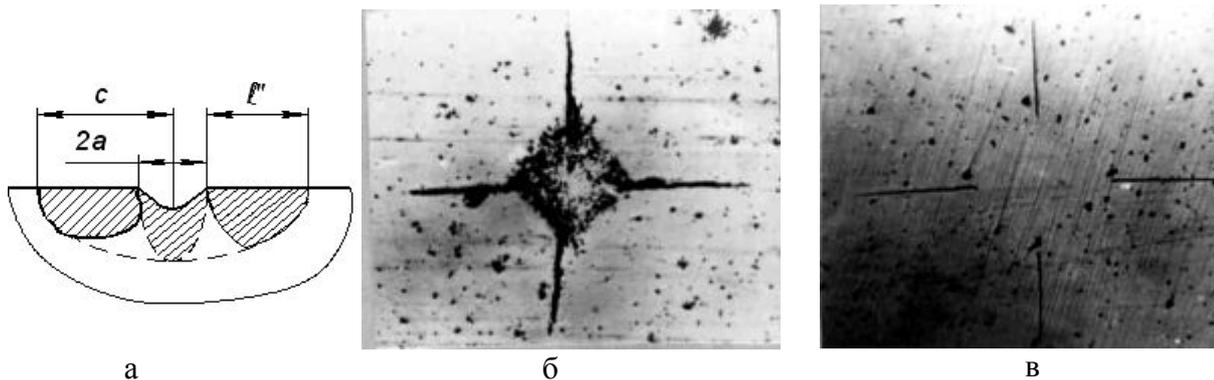


Рис. 5 – Схемы и виды деформирования и разрушения:
 а – схематизированное изображение отпечатка и образующихся трещин Палмквиста;
 б – материал на основе Si_3N_4 ; в – материал на основе ZrO_2

. Размеры таких трещин используются при расчетах коэффициента трещиностойкости по полуэмпирической зависимости (1).

Анализируя особенности поведения кривых повреждаемости (резкие возрастания, убывания, а также относительно стабильное их поведение на отдельных участках, схематически показанных на рис. 6, можем предположить, что это вызвано различным характером процессов, происходящих при нагружении в такого рода материалах.

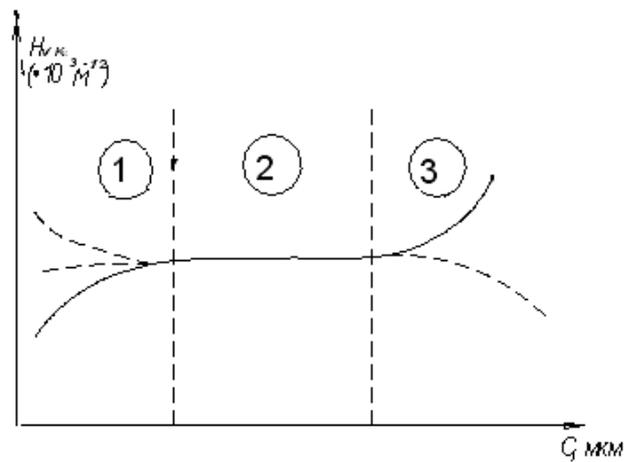


Рис. 6 – Диаграмма повреждаемости керамики при индентировании

Вероятно, первый участок характеризует процессы, происходящие в отдельных частицах (или зернах). Излом диаграммы при переходе от 1-го участка ко 2-му, по видимому, соответствует завершению процесса формирования магистральных (транскристаллитных) трещин в приповерхностных слоях материала.

Второй же излом, на рассматриваемой диаграмме повреждаемости, указывает на переход контролируемого, пропорционального нагружению, развития процессов деформирования и разрушения при индентировании к их лавинообразному нарастанию, т.е. фактически к потере материалом способности противостоять действию механизмов разрушения в зоне отпечатка (рис. 3).

Таким образом, переход к третьему участку диаграммы является наиболее опасным с точки зрения конструкционной прочности этих материалов, так как при достижении определенной величины размера дефекта (трещины) или действующей нагрузки процесс разрушения в них становится уже необратимым.

Поэтому, говоря о твердости и трещиностойкости конструкционной керамики необходимо представлять о какой области значений этих характеристик идет речь.

То ли это рассматриваются процессы деформирования и разрушения на

внутризеренном уровне, то ли речь идет об этих характеристиках материала как такового.

Поскольку разность в значениях исследуемых параметров, а также в особенностях деформирования и разрушения для этих материалов может быть достаточно существенной.

Выводы.

Исходя из особенностей деформирования и разрушения исследуемых материалов при индентировании и используя указанную полуэмпирическую зависимость Ниихары, удалось получить результаты достаточно близкие к данным альтернативных методов, в частности, метода «выращивания» острой трещины в балочке при чистом изгибе [12].

Для исследуемых материалов расхождения в значениях K_{Ic} , полученных при индентировании на участке стабилизации и при изгибе не превышают (3...5) % для диоксидциркониевой и (8 – 10) % для нитридкремниевой керамики.

Учитывая полученные экспериментальные данные можем, вероятно, предполагать, что определенные на втором участке диаграммы повреждаемости керамики, величины твердости и трещиностойкости поверхности находятся наиболее близко к истинным их значениям для исследованных материалов.

Предлагаемая методика и получаемые в ходе исследования данные твердости и трещиностойкости могут использоваться как оценочные характеристики повреждаемости материалов при их создании, а также при проекторочных расчетах изделий из них.

Список литературы: 1. Новиков Н.В. Микротвердость и трещиностойкость монокристаллов кубического нитрида бора / Н.В. Новиков, С.Н. Дуб, В.И. Мальцев // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 5. – С. 16 – 20. 2. Мильман Ю.В. Зависимость твердости от нагрузки на индентор и твердость при фиксированной диагонали отпечатка / Ю.В. Мильман // Проблемы прочности. – 1990. – № 6. – С. 52 – 56. 3. Evans A.G. Toughening of brittle solids by martensitic transformations / A.G. Evans / *Asta metall.* – 1986. – Vol. 34, № 5. – P. 761 – 800. 4. Melles W.H. The exact calculation of stress intensity factors in transformation toughened ceramics by means of integral equation / W.H. Melles // *Int. J. Fract.* – 1989. – Vol. 41, № 1. – P. 1 – 22. 5. Wachtman John B. Ceramics and ceramic composites – opportunities and cooperative research modes / John B. Wachtman // *Defect Prop and Process: High-Tech Nonmetall.*: Boston (Mass.) 2-4 dec. 1985 y.: press. – Pittsburgh (PA), 1986. – P. 3 – 14. 6. Fantuzzi G. Effect of Nonstoichiometry of Fracture Toughness and Hardness of Yttrium Oxide Ceramics / G. Fantuzzi, G. Orange, K. Liang // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1989. – Vol. 72, № 8. – P. 1560 – 1563. 7. Fischer H. Fracture toughness of dental ceramics: comparison of bending and indentation method /

H. Fischer, R. Marx // Dental Mater. – 2002. – № 1. – P. 112 – 119. **8.** Мильман Ю.В. Новые методики микро механических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором / Ю.В. Мильман // Современное материаловедение XXI век: сб. науч. трудов ИПМ. – К.: Наук. думка, 1998. – С. 637 – 655. **9.** Гогоци Г.А. Исследование керамики при внедрении алмазной пирамиды Виккерса / Г.А. Гогоци, А.В. Башта // Проблемы прочности. – 1990. – № 9. – С. 49 – 54. **10.** Niihara K. Evaluation of K_{IC} brittle solids by the indentation method with low crack-to in ratios / K. Niihara, M. Marchall, D.P.H. Hasselmann // J. Mater. Sci. Lett. – 1982. Vol. 1, № 1. – P. 13 – 16. **11.** Гогоци Г.А. Прямое определение сопротивления керамики разрушению по методу краевого скалывания / [Г.А. Гогоци, В.И. Галенко, Г.И. Озерский и др.] // Завод. лаб. – 2006. – № 3. – С. 49 – 53. **12.** Гогоци Г.А. Трещиностойкость керамики на основе диоксида циркония / Г.А. Гогоци, В.П. Завада, А.И. Фесенко. – М., 1989. – 89 с. – Деп. в ВИНТИ, № 2690.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 621.178.15

Механические характеристики прочности приповерхностных слоев конструкционной керамики / А.В. БАШТА // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 15 – 24. – Бібліогр.: 12 назв.

Наведені результати досліджень твердості і тріщиностійкості поверхні зразків конструкційної кераміки методом індентування. По результатах досліджень, для характеристики пошкодження поверхні крихких матеріалів, пропонується використовувати криву пошкоджуваності, яка показує як змінюється величина відношення H_v / K_{Ic} від довжини тріщини індентування.

The results of tests of hardness and fracture toughness of the surface of structural ceramics samples by indentation are shown. According to the results of experiments the curve of damages is proposed to use to give characteristics of brittle materials damage, this curve shows how a number of ratio H_v / K_{Ic} changes from the indent crack length.

С.Д. БОРУК, канд. хим. наук, доц.,

Черновицкий национального университет, Черновцы;

А.И. ЕГУРНОВ, канд. техн. наук, президент,

ООО «АННА-ТЕМС», Днепропетровск

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУСПЕНЗИОННОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Разработана схема получения альтернативного жидкого топлива на основе вторичных топливных энергоносителей – отходов углеобогащения, некондиционного по зольности или содержанию серы угля, технического пирокарбона, нефтяных шламов, продуктов переработки полимерных материалов. Рекомендованные составы, в зависимости от соотношения ингредиентов, концентрации пластификаторов имеют вязкость в диапазоне 0,4 – 1,6 Па·с, седиментационную устойчивость от 14 до 60 суток, причем расслоившиеся системы после перемешивания полностью восстанавливают свои характеристики (вязкость, распределение частиц по объему системы). Ввод в состав специальных добавок позволяет сократить выбросы кислотообразующих газов на 60 – 80 %. Проведенные испытания показали экономическую и экологическую целесообразность применения полученных смесей как топлива.

Украина располагает значительными запасами низкокалорийных углей, широкое и эффективное применение которых позволит значительно расширить энергетическую базу страны [1]. Сырьевая база низкокалорийного топлива также постоянно расширяется за счет отходов углеобогащения.

Углеобогащение, в первую очередь высокозольных углей, сопровождается образованием значительного количества шламов. Так, только на территории Донецкой области в виде терриконов накоплено порядка 3 млрд. тонн твердых отходов с содержанием топливной составляющей 54 – 70 %, 120 млн. тонн – в виде шламов в гидротстойниках.

Перспективным направлением применения перечисленных энергоносителей как топлива является получение на их основе усредненного по составу суспензионного альтернативного топлива для непосредственного сжигания в котлоагрегатах [2, 3].

При создании суспензий на основе низкокалорийных углей и отходов углеобогащения необходимо учитывать, что содержимое органической составляющей в шламах составляет от 40 до 55 %, содержание летучих веществ минимально, что создает определенные сложности для получения на их ос-

© С.Д. Борук, А.И. Егурнов, 2012

нове топлива, пригодного для непосредственного сжигания.

Так, даже при достижении в водных суспензиях на основе угля марки «Г», высокозольных шламах (зола выше 50 % по массе) концентрации 65 – 67 % твердого (масс.), не удастся получить систему, горящую без предварительного обезвоживания или непрерывной «подсветки» газом или другим энергоносителем. Решить проблему горючести суспензий, полученных на основе низкокалорийного топлива возможно путем применения в качестве дисперсионной среды жидких, горючих органических сред.

Проведенные исследования [4 – 6] позволили рекомендовать как дисперсионную среду смесь нефтешламов (нефтяных отложений) и жидких продуктов пиролиза полимерных отходов.

Установлено, что смешение нефтяных отходов и жидких продуктов пиролиза резины позволяет уменьшить вязкость и уменьшить температуру вспышки полученных систем. Физико-химические свойства полученных смесей позволяют применять их как топливо или дисперсионную среду для получения суспензионного угольного топлива.

Для получения угольных суспензий можно использовать низкокалорийные энергоносители (отходы углеобогащения, бурый уголь). Учитывая суммарное содержание топливной составляющей вязкость полученных систем можно легко регулировать путем изменения концентрации твердой фазы.

Седиментационная устойчивость смесей нефтяные отходы – жидкие продукты пиролиза обратно пропорциональна вязкости таких систем. Для повышения устойчивости к расслоению целесообразно вводить в состав смеси дисперсный уголь. Целью нашей работы было определение оптимального состава суспензионного топлива на основе предложенной дисперсионной среды и различных видов твердых энергоносителей: уголь марки «Г», бурый уголь, антрацит, отходы углеобогащения марки «Т», технический пирокарбон.

Получение суспензионного топлива проводили по схеме, приведенной на рис. 1.

Основные физико-химические и эксплуатационные характеристики полученных смесей приведены в табл. 1. Как видно из приведенных данных физико-химические и эксплуатационные характеристики полученных систем позволяют использовать их как топливо. Учитывая доступность и относительную дешевизну исходного сырья, такой вид топлива может успешно конкурировать с традиционными видами жидкого топлива.

Как показали опытно-промышленные испытания, преимуществом топлива рекомендуемого состава является возможность его применения без подсветки.

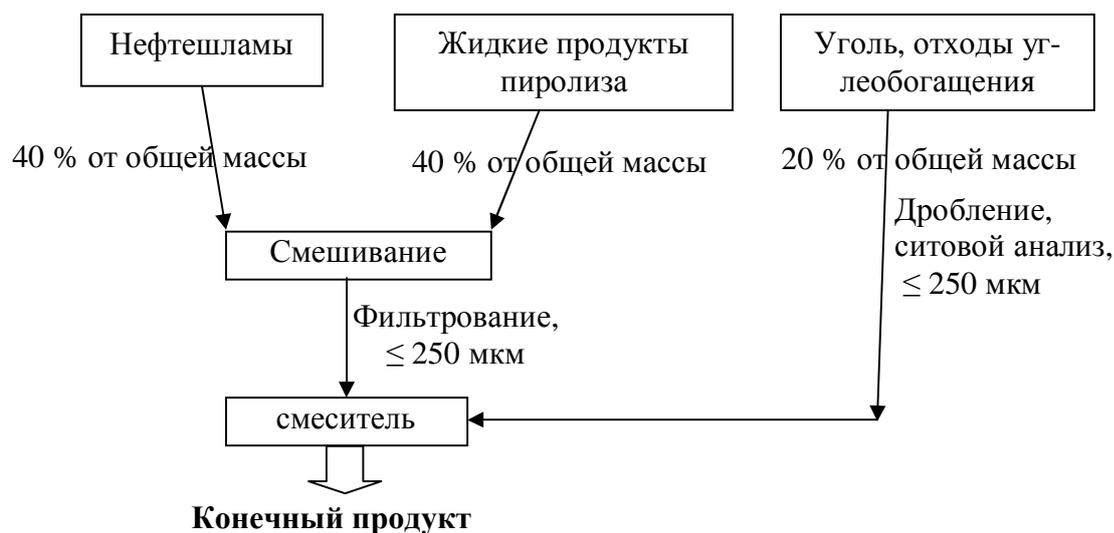


Рис .1. Схема получения альтернативного суспензийного топлива на основе вторичных энергоресурсов

Таблица 1 – Физико-химические и эксплуатационные характеристики суспензий на основе жидких продуктов пиролиза резины

Образец	Эффективная вязкость, Па·с	Седиментационная устойчивость, сутки	Степень выгорания топливной составляющей (%)	Теплообразующая способность (кДж/кг)	Удельные выбросы SO ₂ , кг/ГДж
Исходная смесь жидкие продукты пиролиза резины + нефтяные шламы	0,45	8	100	38600	0,680
Исходная смесь + 20% уголь марки «Г»	0,86	19	99,5	43250	0,720
Исходная смесь + 20% отходы угля марки «Г»	1,05	23	98,0	41500	0,560
Исходная смесь + 20% бурый уголь	0,95	22	98,5	42000	0,640
Исходная смесь + 20% антрацит	0,75	14	99,3	41200	0,660
Исходная смесь + 20% пирокарбон	1,25	28	96,5	44500	0,700

Горение не сопровождается образованием сажи, других продуктов неполного сгорания топлива. Зольные частицы имеют светлую окраску, что свидетельствует о высокой степени выгорания топливной составляющей.

Список литературы: 1. *Вдовиченко В.С.* Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий газ): справочник / [В.С. Вдовиченко, М.И. Мартинова, Н.В. Новицкий, Г.Д. Юшина]. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 184 с. 2. *Дегтяренко Т.Д.* Адсорбция лигносульфонатов на поверхности частиц твердой фазы высококонцентрированных водоугольных суспензий / [Т.Д. Дегтяренко, В.А. Завгородний, А.С. Макаров и др.] // Химия твердого топлива. – 1990. – № 1. – С. 92 – 97. 3. *Макаров А.С.* Высококонцентрированные суспензии на основе отходов углеобогащения. Получение, реологические характеристики и энергетическая ценность / [А.С. Макаров, А.И. Егурнов, С.Д. Борук и др.] // Хімічна промисловість України. – 2007. – № 2 (79). – С. 56 – 60. 4. *Егурнов А.И.* Физико-химические принципы получения композиционного топлива на основе вторичных топливных энергоресурсов / А.И. Егурнов, С.Д. Борук, И.А. Винклер // Збагачення корисних копалин. – 2011. – Вип. № 44 (85). – С. 167 – 173. 5. *Борук С.* Фізико-хімічні та експлуатаційні характеристики сумішей нафтові шлами – рідкі продукти піролізу полімерних матеріалів / С. Борук, Н. Трояновська, І. Борук // Львівські хімічні читання – 2011: XIII наук. конф., 28 трав. – 1 черв. 2011 р.: тези доп. – Львів, 2011. – С. 23. 6. *Егурнов А.И.* Физико-химические основы получения угольного суспензионного топлива на основе органических дисперсионных сред / Егурнов А.И., Борук С.Д. // Современная наука. – 2011. – № 1 (6). – С. 70 – 75.

Поступила в редакцию 20.08.12

УДК 541.183:622.33 + 622.693

Эксплуатационные характеристики и перспективы применения суспензионного угольного топлива / С.Д. БОРУК, А.И. ЕГУРНОВ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 25 – 28. – Бібліогр.: 6 назв.

Розроблена схема отримання альтернативного рідкого палива на основі вторинних паливних енергоносіїв – відходів вуглезбагачення, некондиційного по зольності або вмісту сірки вугілля, технічного пірокарбону, нафтових шламів, продуктів переробки полімерних матеріалів. Рекомендовані склади, залежно від співвідношення інгредієнтів, концентрації пластифікаторів мають в'язкість в діапазоні 0,4 – 1,6 Па×с, седиментаційну стійкість від 14 до 60 діб, причому системи, що розшарувалися, після перемішування повністю відновлюють свої характеристики (в'язкість, розподіл частинок за об'ємом системи). Введення до складу спеціальних добавок дозволяють скоротити викиди кислотоутворюючих газів на 60 – 80 %. Проведені випробування показали економічну й екологічну доцільність застосування отриманих сумішей як палива.

The chart of receipt of alternative oil-fuel is worked out on the basis of secondary fuel power mediums – wastes of enriching of coal an unstandard on an ash-content or maintenance of sulphur of coal, hard wastes of pyrolysis of polymers, petroleum wastes, foods of processing of polymeric materials. Recommended compositions, depending on correlation of ingredients, the concentrations of plasticizers have viscosity in a range 0,4 – 1,6 Pa×s, sedimentation stability a from 14 to 60 twenty-four hours, thus the exfoliating systems after interfusion fully restore the descriptions (viscosity, distribution of particles on volume systems). An input in the complement of the special additions allows to shorten the extrass of oxides of sulphur and nitrogen gases on 60 – 80 % Conducted tests showed financial and ecological viability of application of the got mixtures as fuels.

В.Ф. ГАНКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск,
А.Г. ЛИСНЯК, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск,
Л.В. ГРЯЗНОВА, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА КОЛЕСНЫХ ПАР ШАХТНЫХ ВАГОНЕТОК

Рассмотрены конструктивные и технологические методы повышения надежности колесных пар шахтных вагонеток с учетом их условий эксплуатации.

Основным видом транспорта на шахтах является электровозная откатка.

В трудовых затратах, связанных с добычей руды и угля на долю откатки приходится до 22 %.

Из-за тяжелых условий эксплуатации, несовершенства технологии изготовления и выбора марки стали, конструктивных решений, колесные пары быстро выходят из строя, и срок службы колес и подшипников составляет 4 – 6 месяцев на рудниках Кривбасса и до одного года на угольных шахтах.

Это приводит к значительным затратам материальных средств и рабочего времени, а также к нарушению ритмичности работы шахты и повышению себестоимости полезного ископаемого.

Наличие значительных запасов бурого и каменного угля дают возможность решать проблему независимости по энергоносителям Украины.

Для повышения производительности и ритмичности работы горных предприятий необходимо производить постоянное совершенствование машин и механизмов, и в частности транспортных средств.

Повышение надежности – одно из важнейших задач современности, что связано с непрерывным повышением производительности оборудования и увеличением воздействующих на него нагрузок.

Одной из наиболее сложных задач ресурсосбережения является продление срока службы колесных пар шахтных вагонеток, так как ошибочный подход разработчиков к выбору техничных решений конструкций колеса и всей ходовой части является одной из основных причин малого срока их службы.

Была решена комплексная задача повышения долговечности колес

шахтных вагонеток [1 – 5], включающая совершенствование подшипникового узла, технологии механической обработки посадочных отверстий под подшипники, бандажирование колеса и подрессоривание кузова вагонеток.

Внедрение разработанных рекомендаций позволит в 2 – 4 раза повысить долговечность ходовой части шахтных вагонеток.

Предложена конструкция колеса с максимально раздвинутым расположением подшипников и выполненными непосредственно в ступице колеса торцевыми опорными поверхностями.

Точность монтажа конических роликоподшипников находится в прямой зависимости не только от предельно допустимой несоосности отверстий, но и от расстояния между ними.

В отличие от существующих конструкций фиксации подшипников конической гайкой и шплинтом, который во время эксплуатации часто срезается, в разработанной конструкции предусмотрена шпоночная шайба, надежно обеспечивающая момент трения, возникающей при проскальзывании внутреннего кольца роликоподшипника.

Эффективным решением повышения долговечности колес является его бандажирование, например, из проката улучшенной стали 35, которая обеспечивает допустимые контактные напряжения – 520 МН/м^2 .

Крепление бандажа осуществляется нахолодно запрессовкой на центр колеса до упора с фиксацией от осевого перемещения при помощи специального кольца, на заклепках, которые расклепываются в холодном состоянии.

Изготовление заготовки бандажа возможно из полосы стали 35 со сваркой встык на стыкосварочной машине, чем достигается его равнопрочность.

Заготовка в дальнейшем подвергается горячей штамповке, с формированием реборды и поверхности катания.

Для обеспечения равномерного распределения нагрузки между колесами рекомендуется подрессоривание кузова вагонетки.

Надежность колес в значительной степени определяется структурным состоянием металла.

Разрушение колеса происходит за счет образования усталостных трещин.

Механизм износа, также усталостный износ представляет собой откол тонких пластинок металла в результате образования мелких усталостных трещин в поверхностном слое колеса.

В настоящее время показано, что на поверхности катания стальных колёс образуется наноструктура – тонкий слой с зёрнами размером порядка микрона [6].

Такая структура обладает очень высокой прочностью.

Однако в следствие низкой общей трещиностойкости наноструктурные слои откалываются при повышенном усталостном износе.

Таким образом, для повышения трещиностойкости необходимо повышать вязкость стали, а именно параметр характеризующий трещиностойкость стали.

Как показано в [7, 8] этот параметр повышается при снижении межпластиночного расстояния перлита – основной структуры колесной стали.

Совершенствование технологии производства колес, в частности железнодорожных, подвергающихся большим эксплуатационным нагрузкам, идет в направлении формирования дисперсных перлитных структур углерода в стали [9].

При снижении содержания углерода и повышении содержания легирующих, в частности марганца можно добиться образования перлитных структур и исключить образование первичного феррита по сечению обода, применяя ускоренное охлаждение.

Важным вопросом является технология производства колес.

Колеса шахтных вагонеток в отличии от железнодорожных производятся методом литья в земляные формы, в кокиль или полукокиль.

Для получения мелкозернистой структуры необходимо применять микролегирование стали титаном, ниобием и ванадием в общем количестве до 0,1 – 0,2 %.

В значительной степени на ударную вязкость колесной стали влияет макро и микровключения: сера, фосфор, цветные металлы и растворенные газы [4].

Поэтому особое значение приобретает качество шихты, технология плавки и разливки.

Таким образом, наиболее перспективным направлением может быть применение чистых по примесям сталей выплавленных в электропечах с содержанием углерода 0,4 – 0,45 % и не менее 0,8 % марганца, микролегированных титаном, ниобием и ванадием с низким содержанием серы и фосфора, отливка в кокиль и термическая обработка поверхности катания методом прерывистой закалки с отдельного нагрева.

Обод колеса охлаждается путем спрерного охлаждения до температуры бейнитного превращения – около 400 °С, а отпуск происходит после прекращения охлаждения за счет тепла ступицы.

Образующаяся в поверхности катания структура нижнего бейнита приводит к значительному повышению износостойкости и ударной вязкости

Список литературы: 1. *Аманова М.В.* Оценка износа зоны контакта системы «колесо-рельс» при движении тягового подвижного состава по пути: дисс. ... кандидата техн. наук: спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» / *М.В. Аманова.* – Алма-Ата, 2007. – 185 с. 2. *Ганкевич В.Ф.* Методы повышения эксплуатационных характеристик колес рудничного транспорта / *В.Ф. Ганкевич, А.Н. Коцуней* // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 11. – С. 68 – 69. 3. *Ганкевич В.Ф.* Проблемы изнашивания деталей горнодобывающего оборудования и изыскание методов повышения износостойкости колесных пар шахтных вагонеток / *В.Ф. Ганкевич, А.Н. Коцуней* // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 12. – С. 57 – 60. 4. *Титов А.В.* К определению характеристик двухступенчатых амортизаторов рудничных вагонеток / [*А.В. Титов, В.Ф. Ганкевич, А.Н. Коцуней и др.*] // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 5. – С. 89 – 93. 5. *Канов Г.Л.* Перспективы развития рудничного транспорта / *Г.Л. Канов, В.Ф. Ганкевич* // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 5. – С. 52 – 54. 6. *Perchuc Laura.* Nanostructure formation on the Surface of Railway. Tracks and wheel sets / *Laura Perchuc, Witold Lojkovsky* // Polish Academy of Science. High Pressure Centre. – 2002. – P. 142. 7. *Posehmann I.* Новые марки колесной стали / *I. Posehmann, С. Heermant* // *Eisenbahningemeur.* – 2002. – № 8. – P. 47 – 51. 8. *Узлов И.Г.* Влияние параметров микроструктуры колесной стали на ее вязкие свойства / [*И.Г. Узлов, А.А. Бибоченко, Ж.А. Деменлова и др.*] // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* – 2007. – № 14. – С. 202. 9. *Ахманов Ю.С.* Влияние вакуумирования колесной стали на ее свойства / [*Ю.С. Ахманов, А.Г. Лисняк, О.Н. Перков и др.*] // *Термическая обработка металлов.* – 1978. – № 97. – С. 41 – 42.

Поступила в редколлегию 20.08.12.

УДК 541.183:622.33 + 622.693

Пути повышения ресурса колесных пар шахтных вагонеток / В.Ф. ГАНКЕВИЧ, А.Г. ЛИСНЯК, Л.В. ГРЯЗНОВА // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 29 – 32. – Бібліогр.: 9 назв.

Розглянуті конструктивні та технологічні методи підвищення надійності колісних пар шахтних вагонеток з урахування їх умов експлуатації.

The structural and technological methods of increase of reliability of wheel pairs of mine trolleys are considered taking into account their external environments.

М.Ф. ГНАТЕНКО, канд. техн. наук, директор, ООО «Велма», Киев

ФИЗИКА КОНТРОЛЬНОГО ПРОСЕВА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ, КОНСТРУКЦИЯ СИТА И ПРИВОДА

В работе рассмотрена конструкция сита с регулируемым дозатором, ударным механизмом привода с соответствующими установками частоты, амплитуды и др.

Сфера нашей деятельности – разработка новых технологических приемов и образцов оборудования для изготовления сварочных материалов: покрытых электродов, керамических флюсов и порошковых проволок.

Очень важное значение в производственном процессе занимает подготовка порошков сырьевых компонентов : помол (дробление), **контрольный просев**, сухое смешивание.

Основные сырьевые компоненты – это мрамор (магнезит, доломит), полевые шпаты, слюды, ферросплавы, рутил (ильменит), электродная целлюлоза, карбоксиметилцеллюлоза, сода, поташ, азбест, каолины и др.

Размер частиц готовых порошков составляет от нескольких микрон до 400 мк, их удельный вес колеблется от 1 до 10 г/см³, а форма – от шарообразной до остроконечной, пластинчатой, игольчатой.

В нашем технологическом процессе контрольный просев всех порошкообразных компонентов **обязателен**.

Как правило, просев осуществляется через сито с размером проходной ячейки от 0,25 до 0,63 мм (в зависимости от соответствующих специальных требований).

Общеизвестно, что на эффективность просева влияет очень много факторов:

- влажность порошков;
- размер, форма и удельный вес частиц;
- размер проходной ячейки сита;
- конструкция сита, в т.ч. привод движения сита (частота и амплитуда), дозатор порошка на сито;
- наличие распределяющих и направляющих элементов для активации прохождения порошка через сито.

Но физика процесса просева одна: частички с размером, меньшим, чем

размер проходного сечения ячейки, должен пройти через сито, а крупные – по сетке уйти в сторону в другую емкость. Для этого порошок должен подаваться определенным образом на сетку. Последняя должна быть в возвратно-поступательном движении: материал сдвигается, своды разрушаются, т.е. частички должны быть в движении.

Большинство существующих сит являются вибрационными (эксцентриковыми, дисбалансными и т.п.). А это значит, что скорость возвратно-поступательного движения меняется от 0 до максимума при разной частоте и амплитуде. И, как правило, эти движения сетки происходят преимущественно в плоскости сетки. В некоторых случаях сетка имеет возможность совершать более сложные движения. Добавляется движение под разным (неуправляемым) углом к плоскости сетки. В редких случаях корпус сетки дополнительно подвержен и ударным нагрузкам.

Но это не оптимальный вариант возбуждения сетки.

Правда есть сита с непосредственным возбуждением сетки практически в перпендикулярном направлении к поверхности сетки (вертикальном). Но проблема в том, что при этом не достигается равномерное (одинаковое по амплитуде) колебание сетки по всей ее поверхности.

К тому же жесткость (упругость) сетки в перпендикулярном направлении значительно меньшая, чем в продольном, а значит для возбуждения (движения) собственно порошка следует обеспечивать большие амплитуды колебаний. Важно также, чтобы привод сетки обеспечивал ее ударно-поступательное движение.

Все перечисленное очень сильно влияет на эффективность просева.

Анализ литературных первоисточников, предварительных результатов работы имеющихся типов сит, а также накопленный опыт проведенных экспериментов в этом направлении позволил нам сделать следующие выводы по оптимизации конструкции сита и его привода:

- масса собственно колеблющейся части с сеткой должна быть минимальной, в т.ч. за счет минимизации площади просеивания;

- контрольная сетка должна иметь защитную сетку сверху на расстоянии ≈ 20 мм с размером ячейки, несколько большим, чем на контрольной, дабы большая часть закрупленной фракции не перегружала контрольную сетку и не перекрывала ее проходные ячейки;

- натяжка и жесткость сетки (в т.ч. в перпендикулярном направлении) должны быть максимально допустимыми для нее и одинаковыми по всей

площади;

- рамка с сеткой должна легко и быстро заменяться на другую;
- жесткость установки рамки сетки должна быть достаточно высокой, что обеспечит эффективность достижения резонанса;
- в конструкцию всего сита должен входить **регулируемый** дозатор порошка, обеспечивающий его подачу на сетку по всей ее ширине;
- привод рамки с сеткой должен быть ударным с регулируемой частотой и амплитудой, а также с разным соотношением между временем удара и паузой между ударами; очень важно, что при этом движение сетки должно происходить и в вертикальном направлении.

Последнее максимально способствует прохождению частиц порошка соответствующего размера через ячейки сита, т.к. в этом направлении работает и основная сила прохождения частиц – сила земного тяготения;

- привод сита с ударом прозвляет устранять забивание ячеек сетки частичками порошка, особенно если они имеют остроконечную форму (молотые ферросплавы) или анизодиаметрическую (слюда, асбест, воллостанит и др.);

- при просеве «легких» порошков целесообразно применять специальные элементы для подпирания частичек к сетке без увеличения ее стирания.

В конечном итоге нами была разработана конструкция сита с регулируемым дозатором, ударным механизмом привода с соответствующими установками частоты, амплитуды и др. (рисунок).



Рис. – Конструкция сита

При общей установленной мощности сита ≈ 200 Вт и размерах

сетки $\approx 275 \times 475$ мм с ячейкой 0,4 мм, производительность по мелкому мрамору ($\sim 60 \% \leq 0,05$ мм) достигает ≈ 250 кг/час, а по ферромарганцу – ≈ 400 кг/час. (При этом просев заканчивается на длине сетки ≈ 300 мм.)

Сито полностью герметично.

Оно устанавливается на специальной эстакаде.

Сверху к приемному фланцу дозатора сита пристыковывается промежуточная воронка эстакады.

В воронку с использованием технологического контейнера загружается материал для контрольного просева, а снизу к сити герметично пристыковываются емкости для готового порошка и отдельно для отсева.

Эффективность работы сита достаточно высока при контрольном просеве всех вышеперечисленных материалов.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 622.74

Физика контрольного просева мелкодисперсных порошков, конструкция сита и привода / **М.Ф. ГНАТЕНКО** // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 33 – 36.

В роботі розглянута конструкція сита з регулюючим дозатором, ударним механізмом приводу з відповідними установками частоти, амплітуди та ін.

The paper deals with the design screen with adjustable dispenser, impact drive mechanism with the relevant units of frequency, amplitude, and other.

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск,
Л.Ж. ГОРОБЕЦ, докт. техн. наук, проф., ГВУЗ «НГУ»,
Днепропетровск,
Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук, ст. научн. сотруду., ИТМ НАН и НКА
Украины, Днепропетровск,
К.А. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «НГУ»,
Днепропетровск,
Л.А. ЦЫБУЛЬКО, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «НГУ»,
Днепропетровск,
И.В. ВЕРХОРОБИНА, инж., ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ СТРУЙНОЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Обоснован критерий оценки работы струйной мельницы с позиций оптимизации процесса измельчения. Установлена величина критерия в лабораторных и промышленных условиях измельчения твердых сыпучих материалов.

Постановка проблемы. Проблема установления и поддержания эффективного режима измельчения при заданном качестве тонкодисперсного продукта (с удельной поверхностью более $0,5 - 1,0 \text{ м}^2/\text{г}$) является важной и актуальной из-за повышенной энергоемкости процессов тонкого измельчения (диспергирования). Анализ физических закономерностей измельчения [1, 2] и экспериментальных исследований работы струйных мельниц [3 – 5] позволяет считать перспективным использование акустоэмиссионной информации об эффектах разрушения частиц в зоне помола для разработки критерия оптимизации процесса струйного измельчения. Впервые применение метода акустической эмиссии (АЭ) для оценки эффектов измельчения при нагружении трехосным сжатием модельных образцов горных пород показано в работе [1]. При этом научную базу для выбора оптимальных режимов измельчения составили закономерности развития стадии диспергирования с учетом современной теории предразрушения твердого тела [6].

В настоящее время прогнозная оценка удельных энергозатрат на измельчение осуществляется на основе следующих параметров АЭ: скорости

счета \dot{N} акустических сигналов (АС) за пределом прочности и акустоэмиссионной эффективности разрушения N_ε ($N_\varepsilon = N/\varepsilon$, N – суммарный счет АС за период нагружения, ε – деформация за пределом прочности). Экспериментально показано, что при накоплении сигналов преимущественно малых амплитуд ожидается повышенное количество тонких фракций микронных размеров в разрушенном продукте.

Анализ исследований. Производительность струйной мельницы значительно изменяется в зависимости от степени загрузки струй материалом. Избыточное или недостаточное количество твердой фазы в струе приводит к отклонению от оптимального уровня ведущих параметров измельчения: скорости и частоты соударений частиц, что обуславливает уменьшение производительности мельницы при прочих равных условиях (параметры энергоносителя, режим работы классификатора и пневмотранспортной системы).

В работах [4, 5] предложена методика акустического мониторинга работы струйной мельницы, которая позволяет контролировать изменение загрузки мельницы материалом с помощью анализа акустических параметров зоны измельчения. Это означает, что выявление оптимального наполнения струй твердой фазой и поддержание оптимального режима работы струйной мельницы возможно на основе непрерывного контроля акустических параметров зоны помола с последующим управлением загрузкой измельчаемого материала. При этом весьма информативны акустическая активность и амплитудные распределения акустических сигналов [7]. В работе [8] установлены закономерности изменения акустической активности зоны помола в зависимости от производительности лабораторной струйной мельницы и степени дисперсности продукта, оцениваемой по величине удельной поверхности. Степень приближения процесса измельчения к оптимальным условиям характеризуют условным коэффициентом K_ε (г/имп) эффективности измельчения ($K_\varepsilon = G / \lg \dot{N}$), определяемым как отношение производительности мельницы G к логарифму акустической активности зоны помола.

Постановка задачи. Целью данной работы является обоснование и экспериментальное определение акустического критерия для оценки работы струйной мельницы, включающего значения амплитуды и числа АС в зоне помола. В работе предусматривается анализ акустической информации о работе лабораторной мельницы на ряде сыпучих твердых материалов и результатов промышленного опробования акустического мониторинга в условиях ВГМК на примере струйного измельчения цирконового концентрата.

Изложение основного материала и результаты исследования.

Экспериментальные исследования по установлению величины акустического критерия проведены при измельчении сыпучих материалов в лабораторной и промышленной струйной установках соответственно для типоразмеров УСИ-20 производительностью 20 кг/ч и УСИ-2000 – 2000 кг/ч.

Акустическую активность зоны помола измеряли с помощью датчика, соединенного с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры мельницы. Анализ акустических сигналов проводился по следующей методике. Рассматривались АС с величиной амплитуды более 20мВ при частоте регистрации 400 кГц (200 кГц). В ходе мониторинга периодически, за выбранный интервал времени (порядка нескольких десятков секунд или миллисекунд) вычислялись значения максимальной амплитуды A_{max} , общей \dot{N}_{Σ} и частной $\dot{N}_{A_{max}}$ активности акустического излучения зоны помола, рассчитываемой по суммарному счету N_{Σ} АС и выборке числа АС с максимальной амплитудой за период τ . За максимальную величину амплитуды принималась амплитуда сигналов, число которых в общей сумме сигналов составляло величину $\dot{N}_{A_{max}} \geq (5 - 7)\% \cdot \dot{N}_{\Sigma}$. Поскольку амплитуда АС при соударениях частиц с волноводом в зоне помола пропорциональна скорости удара, увеличивающей эффект разрушения, полагаем, что акустические сигналы максимальной амплитуды характеризуют наиболее эффективные соударения частиц с максимальными эффектами измельчения. Другим важным фактором струйного измельчения является частота эффективных соударений частиц, характеризуемая акустической активностью. В этой связи величину акустического критерия K_a оптимальной работы мельницы определяем как произведение величины максимальной амплитуды A_{max} на общую \dot{N}_{Σ} или частную $\dot{N}_{A_{max}}$ величину акустической активности:

$$K_a(\dot{N}_{\Sigma}) = A_{max} \cdot \dot{N}_{\Sigma}; \quad K_a(\dot{N}_{A_{max}}) = A_{max} \cdot \dot{N}_{A_{max}}; \quad (1)$$

С позиций физики разрушения предложенный критерий характеризует акустический эффект трансформации кинетической энергии ускоренных струями частиц в акустическую энергию трещинообразования при разрушении частиц ударами и, таким образом, величина предложенного критерия (В/с) теоретически пропорциональна энергонапряженности разрушения частиц в процессе струйного измельчения.

Обработка экспериментальных данных показала, что предпочтительнее проводить расчет по первой формуле из-за более широкого диапазона изменения критерия в различных режимах измельчения. Анализ данных акустического мониторинга процесса струйного измельчения различных сыпучих материалов (кварцевый песок, шлак, шамот, циркон, уголь) позволил обозначить границы (допустимые и недопустимые с позиций оптимальности процесса) изменения K_a за один технологический цикл измельчения (загрузка одной порции, измельчение, разгрузка струи, выгрузка продукта). Оптимальная величина K_a соответствует диапазону $(19 - 35) \cdot 10^3$ В/с, допустимая $K_a^{don} = (6 - 17) \cdot 10^3$ В/с и недопустимая $K_a^{nedon} = (0,4-6) \cdot 10^3$ В/с.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Условия и результаты струйного измельчения с расчетными значениями акустического критерия K_a оптимальной работы мельницы

№	Материал	$d_{исх}$, мм	ρ , г/см ³	$K_a \cdot 10^{-3}$, В/с			A_{max} , мВ	\dot{N}_Σ , мс ⁻¹	n , мин ⁻¹	Q , кг/ч	$S_{уд}$, м ² /г
				1*	2*	3*					
Лабораторная струйная мельница УСИ-20											
1	кварц. песок	0,3	2,65	35,5	17,0	5,4	250	142	2000	4,0	0,7
2	газ. уголь	0,1	1,4	12	6	2	100	200	1800	6,2	0,98
3	шлак	2,5	2,9	32	15,7	3,3	160	200	2000	5,4	0,61
4	циркон	0,16	4,7	16,1	10	6	140	115	600	19	0,21
5	циркон	0,16	4,7	10	2	0,4	100	100	2000	2,7	0,55
6	шамот	2,5	2,8	23	16	2,3	240	96	2000	8,0	0,59
Промышленная струйная установка УСИ-2000											
7	циркон	0,16	4,7	34	21	11	180	189	180	800	0,19

Примечание: 1* – оптимальные, 2* – неоптимальные, 3* – недопустимые режимы измельчения

Проведенные испытания и расчеты показали, что величина критерия оптимальности струйного измельчения изменяется в зависимости от свойств исходного материала (плотности, размера частиц), измельчаемости исследуемым методом и дисперсности $S_{уд}$ измельченного продукта (удельной поверхности). Данные табл. показывают, что повышение плотности материала обуславливает некоторое снижение производительности мельницы. При этом величина критерия оптимальности также уменьшается при измельчении материалов повышенной плотности, что можно наблюдать на примерах циркона и кварцевого песка: для циркона $K_a = 16,1 \cdot 10^3$, для кварцевого песка $K_a = 35,5 \cdot 10^3$. Для недопустимого (неэффективного, с низкой производительностью мельницы) режима измельчения величина критерия K_a практически

одинакова для одного порядка дисперсности измельченных продуктов: $K_a = (2 - 3) \cdot 10^3$ при $S_{y\partial} = 0,59 - 0,61 \text{ м}^2/\text{г}$. На рис. 1 приведены записи акустического излучения рабочей зоны лабораторной и промышленной установок при струйном измельчении цирконового концентрата.

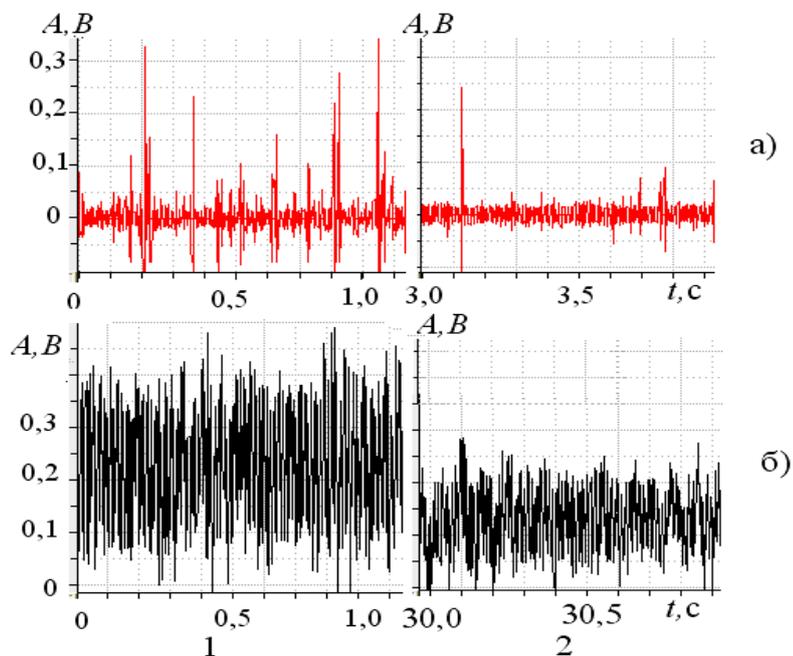


Рис. 1 – Записи акустических сигналов зоны помола цирконового концентрата в лабораторной (а) и промышленной установках (б):
1 – оптимальный режим, 2 – недопустимый режим.

На рис. 2 выполнен анализ акустической активности \dot{N} струйного измельчения цирконового концентрата в оптимальном (1) и недопустимом (2) режиме работы лабораторной (а) и промышленной (б) мельниц. Как установлено, акустическим признаком выхода мельницы из оптимального режима в недопустимый (неэффективный) режим является значительное сужение распределений активности АС по амплитудам. Сравнительный анализ акустических параметров позволяет считать более эффективной работу промышленного образца струйной мельницы, что подтверждается расчетными данными акустического критерия, приведенными в табл. 1. Рис. 3 иллюстрирует кинетику акустического критерия оптимальной работы лабораторной и промышленной мельниц при измельчении циркона. Видно, что в пределах одного технологического цикла измельчения наблюдается тенденция уменьшения величины K_a , объясняемая текущей разгрузкой струй от твердой фазы в процессе удаления готового продукта в циклон, причем, угол наклона этой зависимости значительно больший для промышленных условий измельчения.

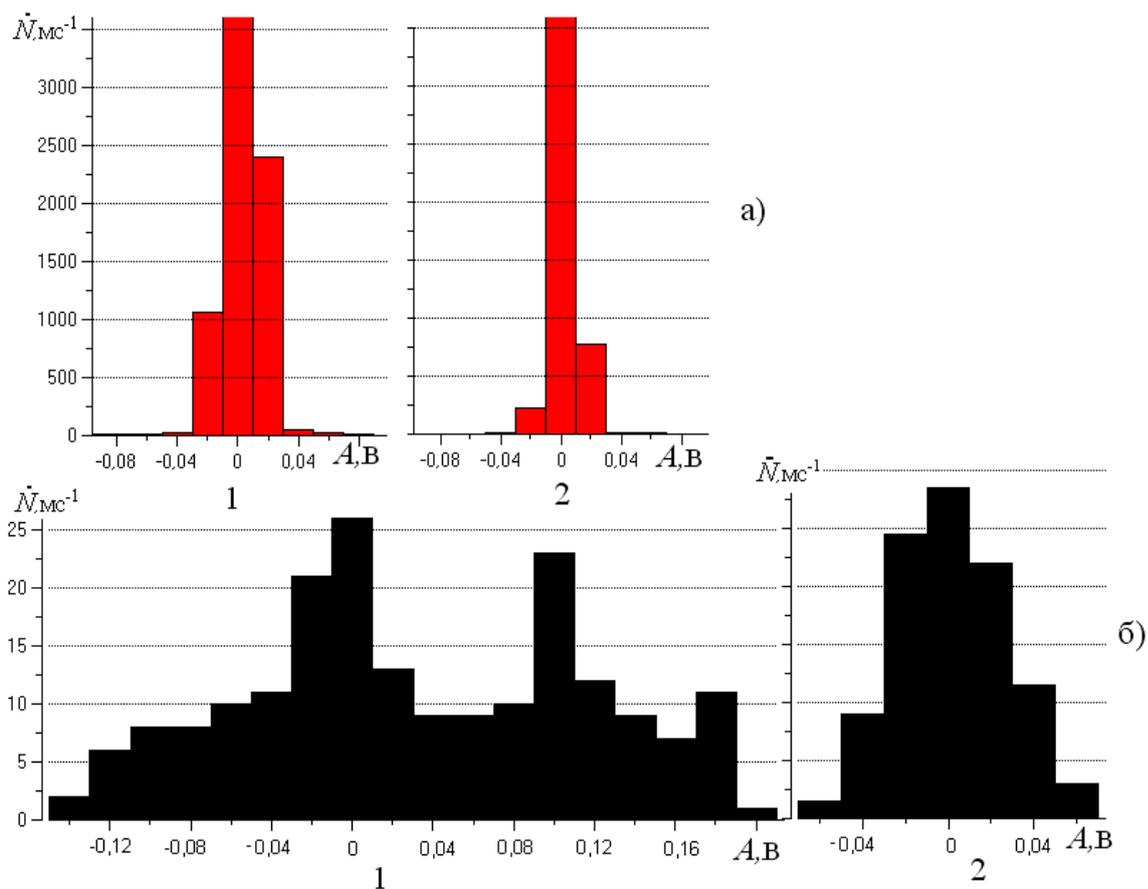


Рис. 2 – Анализ акустической активности \dot{N} струйного измельчения цирконового концентрата в оптимальном (1) и недопустимом (2) режимах на лабораторной (а) и промышленной (б) мельницах

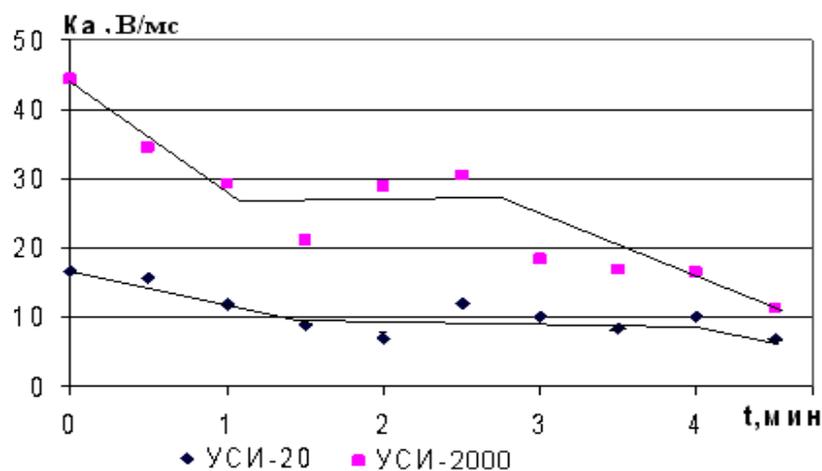


Рис. 3 – Кинетика акустического критерия оптимальной работы лабораторной и промышленной мельниц при измельчении циркона

Следовательно, крайне важна своевременная загрузка новых порций исходного материала с проведением непрерывного акустического мониторинга, что позволит обеспечить величину критерия оптимальности на уровне выше

$K_a^{доп}$. Границы $K_a^{доп}$ для других измельчаемых материалов в условиях лабораторной мельницы показаны на рис. 4.

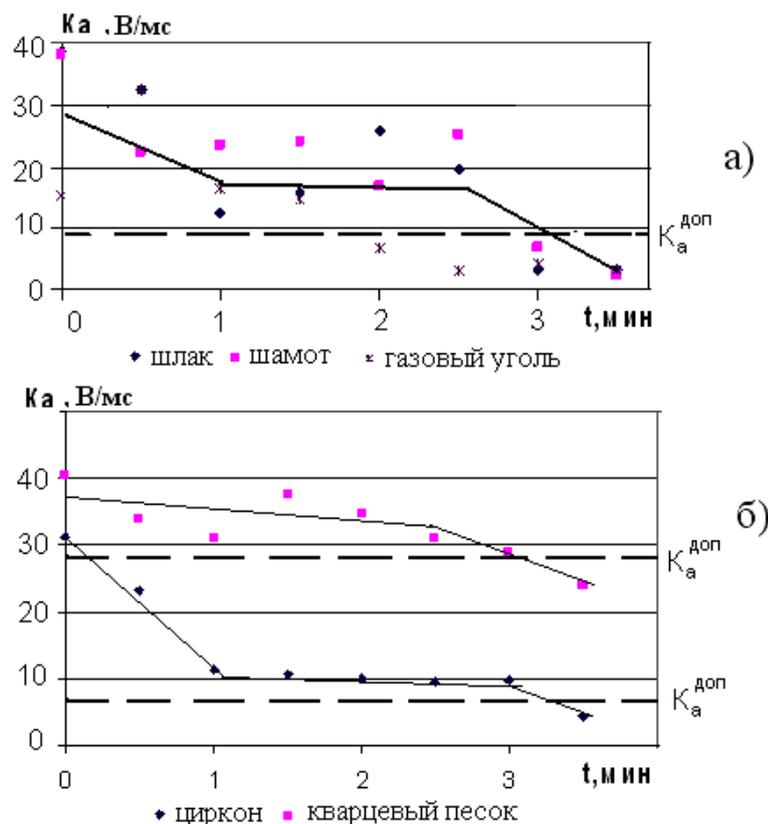


Рис. 4 – Кинетика акустического критерия оптимальной работы струйной мельницы при измельчении разнообразных сыпучих материалов

Полагаем, что граница допустимости критерия должна соответствовать переходу оптимального режима измельчения в неоптимальный режим, так чтобы исключить появление недопустимых режимов работы мельницы с меньшей производительностью.

Исследование показало, что рекомендуемый уровень значений K_a находится в зависимости от соблюдаемой дисперсности готового продукта: при $S_{уд} = 0,6 - 0,7 \text{ м}^2/\text{г}$ (песок, шамот, шлак) $K_a = (23 - 35) \cdot 10^3 \text{ В/с}$, тогда как при $S_{уд}$ до $0,98 \text{ м}^2/\text{г}$ (газовый уголь) $K_a = (12 - 15) \cdot 10^3 \text{ В/с}$. Проведенное акустическое исследование послужило основой для разработки алгоритма контроля оптимальной работы струйной мельницы. Блок-схема алгоритма, включающего расчет критерия оптимальности K_a в течение акустического мониторинга, представлена на рис. 5.

Предварительно устанавливаются необходимые технологические параметры (P, n, t) и на основании имеющихся опытных данных по измельчению

конкретного материала задается допустимый акустический критерий оптимальной $K_a^{\text{доп}}$ работы струйной мельницы. В процессе акустического мониторинга процесса измельчения измеряется спектр активности и амплитуд АС, определяются максимальные амплитуды A_{max} и общее число сигналов \dot{N}_{Σ} за выбранные интервалы (Δt , с, мс) времени. По результатам измерений вычисляются текущие значения критерия оптимальности K_a , которые сравниваются с заданным допустимым значением критерия $K_a^{\text{доп}}$. Если текущая расчетная величина критерия снижается до уровня менее $K_a^{\text{доп}}$, проводится контроль качества получаемого продукта. При соблюдении технологических параметров процесса на заданном уровне, подается сигнал либо на остановку мельницы (по окончании опыта), либо на дополнительную, очередную загрузку порции исходного материала (в случае продолжения опыта).

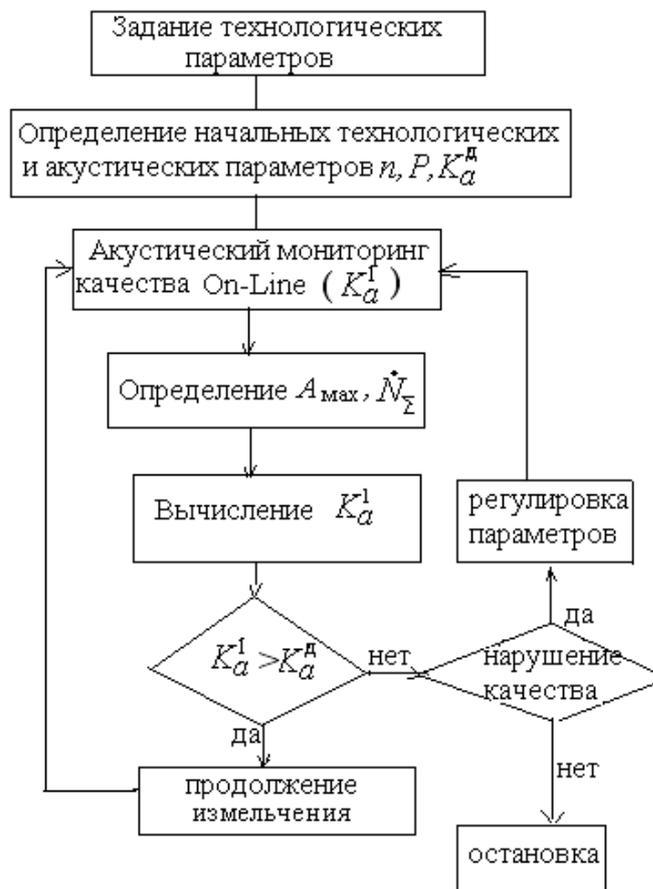


Рис. 5 – Алгоритм контроля оптимальной работы струйной измельчительной установки

Выводы.

В результате теоретического обоснования и экспериментального исследования процесса струйного измельчения предложен акустический критерий

для оценки степени оптимальности работы измельчительной установки.

В условиях измельчения разнообразных сыпучих материалов установлены оптимальные и предельно допустимые значения предложенного критерия, включающего наиболее важные акустические параметры – амплитуду и активность акустического излучения зоны помола.

Разработан алгоритм контроля оптимальной работы струйной мельницы, включающий расчет критерия оптимальности K_a в течение акустического мониторинга зоны помола.

Список литературы: 1. Горобец Л.Ж. Исследование акустоэмиссионных свойств природных материалов в режиме высоких давлений / [Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, С.Б. Дуброва и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1995. – № 3. – С. 65 – 73. 2. Пилов П.И. Технологические возможности струйных измельчителей / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина // ГИАБ. – 2007. – № 3. – С. 359 – 367. 3. Пилов П.И. Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др.] // ЗКК – 2008. – № 34 (75). – С. 67 – 74. 4. Пилов П.И. Параметры мониторинга и показатели струйного измельчения полезных ископаемых / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко // Вісник КТУ. – 2010. – Вип. 27. – С. 59 – 64. 5. Пилов П.И. Исследование рабочей зоны струйной мельницы на основе акустического мониторинга / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др.] // VIII Конгресса обогатителей стран СНГ, 28 февр. – 2 мар. 2011 г.: сборник докл. – М., 2011. – Т. 1. – С. 302 – 305. 6. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дисс. ... доктора техн. наук: спец. 05.15.08 «Збагачення корисних копалин» / Л.Ж. Горобец. – Днепропетровск, 2004. – 36 с. 7. Пилов П.И. Исследование амплитудных распределений акустических сигналов процесса струйного измельчения / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др.] // Разработка рудных месторождений. – 2011. – Вып. 94. – С. 266 – 268. 8. Пилов П.И. Акустические «образы» режимов струйного измельчения / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 65. – С. 127 – 138.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 622.73

Обоснование критериев оптимальной работы струйной измельчительной установки / П.И. ПИЛОВ, Л.Ж. ГОРОБЕЦ, Н.С. ПРЯДКО, К.А. ЛЕВЧЕНКО, Л.А. ЦЫБУЛЬКО, И.В. ВЕРХОРОБИНА // Вісник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 37 – 45. – Библиогр.: 8 назв.

Обґрунтовано критерій оцінки роботи струменевого млина з позицій оптимізації процесу подрібнення. Встановлено величина критерію в лабораторних і промислових умовах подрібнення твердих сипких матеріалів.

An assessment criterion of jet mill work from positions of grinding process optimization is proved. The criterion value in laboratory and industrial conditions of firm loose materials grinding is established.

И.А. ЕМЕЛЬЯНОВА, д-р техн. наук, проф., ХНУСА, Харьков,
А.И. АНИЩЕНКО, асп., ХНУСА, Харьков,
А.Н. ПЛУЖНИК, асп., ХНУСА, Харьков,
В.Ю. ШЕВЧЕНКО, асп., ХНУСА, Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКТА ОБОРУДОВАНИЯ С БЕТНОСМЕСИТЕЛЕМ ГРАВИТАЦИОННО- ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Приведена методика определения основных показателей работы технологического комплекта оборудования, состоящего из бетоносмесителя гравитационно-принудительного действия и ленточно-скребкового питателя.

Приготовление строительных смесей высокого качества – один из важных вопросов в строительной индустрии. Для осуществления такой задачи на кафедре механизации строительных процессов Харьковского национального университета строительства и архитектуры создан технологический комплект оборудования (рис. 1), который включает в себя бетоносмеситель гравитационно-принудительного действия, с помощью которого осуществляется приготовление однородных смесей различного назначения, и ленточно-скребковый питатель, обеспечивающий подачу компонентов смеси.

Смеситель гравитационно-принудительного действия (рис. 2) [1, 2] объединяет в себе два принципа перемешивания – гравитационный и принудительный, что позволяет машине работать в каскадном режиме. Бетоносмеситель гравитационно-принудительного действия состоит из корпуса цилиндрической формы, к внутренней поверхности которого прикреплены лопатки рядами по всей его длине. В середине корпуса расположен горизонтальный вал с лопатками, которые закреплены на нем по винтовой линии. Лопатки на корпусе расположены под углом 30° , а на валу под 45° . Корпус машины и лопастной вал вращаются в противоположных направлениях.

Техническая характеристика технологического комплекта оборудования:

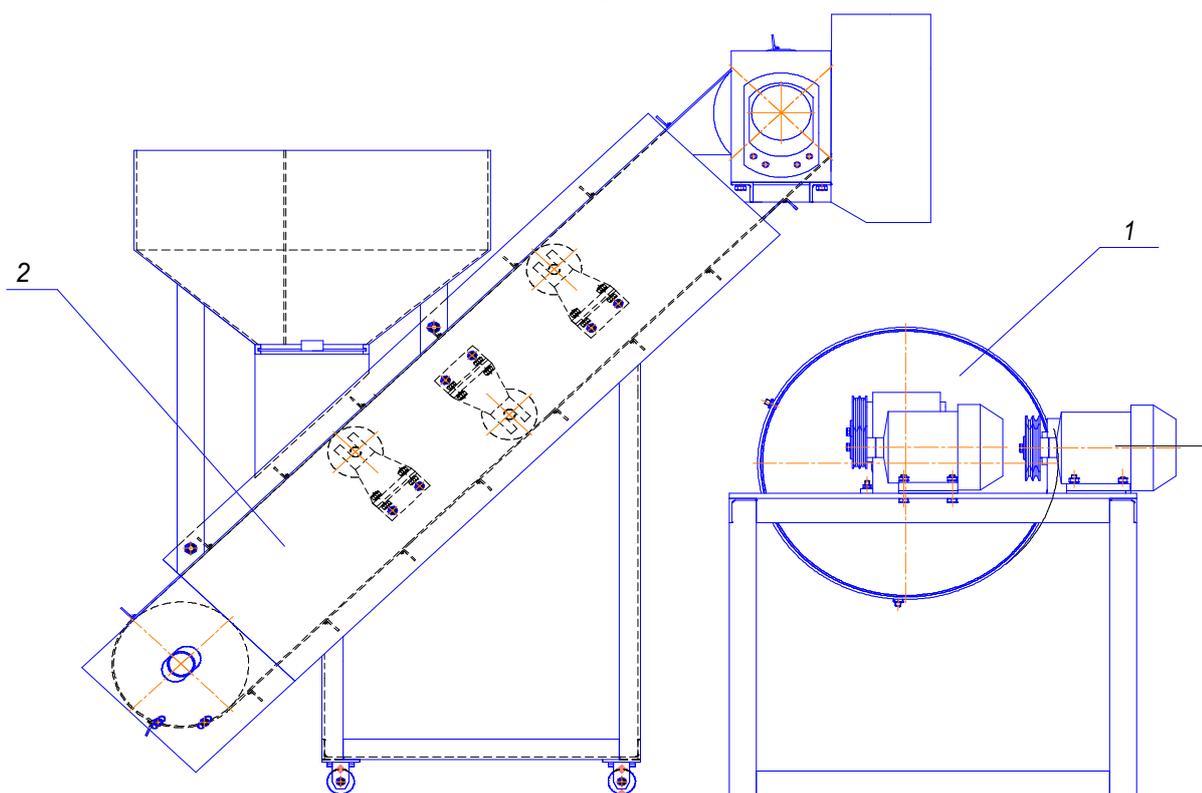
производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$ 4...4,5

© И.А. Емельянова, А.И. Анищенко, А.Н. Плужник, В.Ю. Шевченко, 2012

максимальный размер заполнителя, мм	10
общая мощность двигателей, кВт	4,5
габаритные размеры, мм:	
длина	2200
ширина	1400
высота	1500



а



б

Рис. 1 – Технологический комплект оборудования: а – бетоносмеситель гравитационно-принудительного действия; б – ленточно-скребковый питатель

Ленточно-скребковый питатель (рис. 3), расположенный относительно бетоносмесителя под углом 40°, предназначен для подачи инертных материалов (щебень, песок, цемент) в рабочее пространство машины, поступающих

из загрузочного бункера.

Основными характеристиками работы технологического комплекта оборудования являются эксплуатационная производительность и мощность.

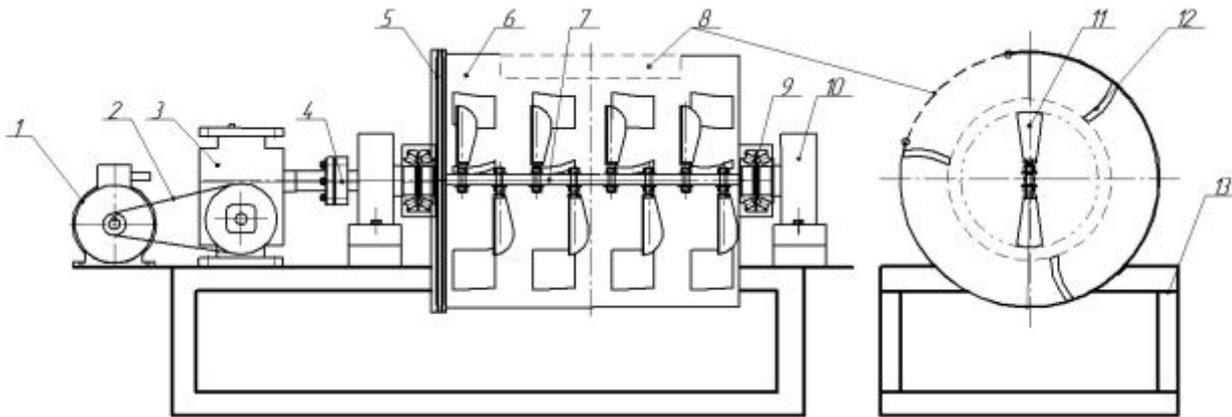


Рис. 2 – Схема бетоносмесителя гравитационно-принудительного действия: 1 – электродвигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – червячный редуктор; 4 – втулочно-пальцевая муфта; 5 – цепная передача; 6 – барабан; 7 – вал; 8 – загрузочно-разгрузочное отверстие; 9 – подшипниковые узлы; 10 – роликоопоры; 11 – лопатки вала; 12 – лопатки корпуса; 13 – рама бетоносмесителя.

Определение эксплуатационной производительности бетоносмесителя гравитационно-принудительного действия производится с учетом конструктивных параметров машины и особенностей рабочего процесса (рис. 4):

$$P_{\text{эксpl}} = V_{\text{общ}} \cdot Z_{\text{ц}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

$$P_{\text{эксpl}} = V_{\text{общ}} \cdot Z_{\text{ц}} \cdot \rho_0, \text{ т/ч}, \quad (2)$$

где $V_{\text{общ}}$ – общий объем смеси, находящийся в корпусе смесителя, м^3 ; ρ_0 – средняя плотность бетонной смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; $Z_{\text{ц}} = 3600/t_{\text{ц}}$ – количество циклов работы машины в час; $t_{\text{ц}}$ – продолжительность одного цикла, которая состоит из суммы продолжительности загрузки компонентов t_1 , их перемешивания t_2 и разгрузки готовой смеси t_3 ($t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3$), с.

Общий объем смеси, находящийся в корпусе смесителя при коэффициенте заполнения объема смесителя $\kappa_{\text{зо}} = 0,5$ (рис. 4), можно определить по формуле, м^3 :

$$V_{\text{общ}} = V_{\text{к}} - V_{\text{в}} - V_{\text{н}} - V_{\text{лк}} - V_{\text{лв}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{к}}$ – объем смеси, находящийся в корпусе, при коэффициенте заполнения

объема смесителя $k_{30} = 0,5 \text{ м}^3$; V_v – объем вала, м^3 ; V_n – объем ножки лопатки вала, м^3 ; $V_{лк}$, $V_{лв}$ – соответственно объемы лопаток корпуса и вала, м^3 .

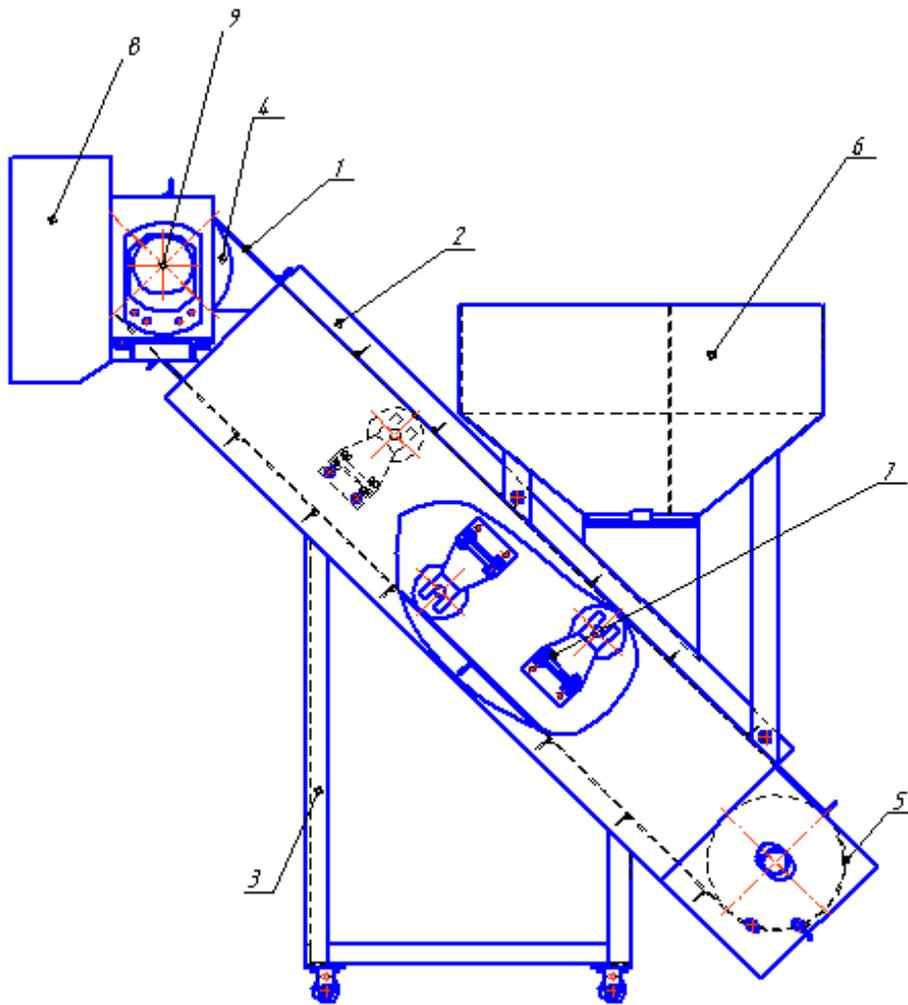


Рис. 3 – Ленточно-скребковый питатель: 1 – лента со скребками; 2 – кожух; 3 – передвижная рама; 4 – приводной барабан; 5 – натяжной барабан; 6 – загрузочный бункер; 7 – ролико-опоры; 8 – направляющий кожух; 9 – мотор-редуктор.

При подстановке геометрических параметров машины уравнение (3) принимает вид:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{общ}} &= \frac{1}{2} \pi \cdot R_k^2 \cdot L_k \cdot k_o - \frac{1}{2} \pi \cdot r_v^2 \cdot L_k - \frac{1}{2} \pi \cdot r_n^2 \cdot l_n \cdot z_n - \frac{1}{2} z_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot c_1 - \frac{1}{2} z_2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot c_2 = \\
 &= \frac{1}{2} [\pi \cdot L_k (R_k^2 \cdot k_o - r_v^2) - \pi \cdot r_n^2 \cdot l_n \cdot z_n - z_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot c_1 - z_2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot c_2], \text{ м}^3, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где L_k – длина корпуса смесителя, м; R_k – радиус корпуса смесителя, м; k_o – коэффициент, учитывающий заполнение корпуса машины смесью (при $k_{30} = 0,5$; $k = 1$); r_v – радиус вала, м; r_n , l_n , z_n – радиус, длина ножки лопатки вала и их количество, м; z_1 , b_1 , h_1 , c_1 – количество, длина, высота и толщина ло-

паток корпуса смесителя, м; z_2, b_2, h_2, c_2 – количество, длина, высота и толщина лопаток вала смесителя, м.

При увеличении коэффициента заполнения корпуса машины смесью (κ_{30} до 0,6...0,7) коэффициент k_o , учитывающий заполнение машины смесью, будет равен $k_o = 1,2...1,4$, а при уменьшении коэффициента заполнения объема смесью машины (κ_{30} до 0,4...0,45) – $k_o = 0,8...0,9$.

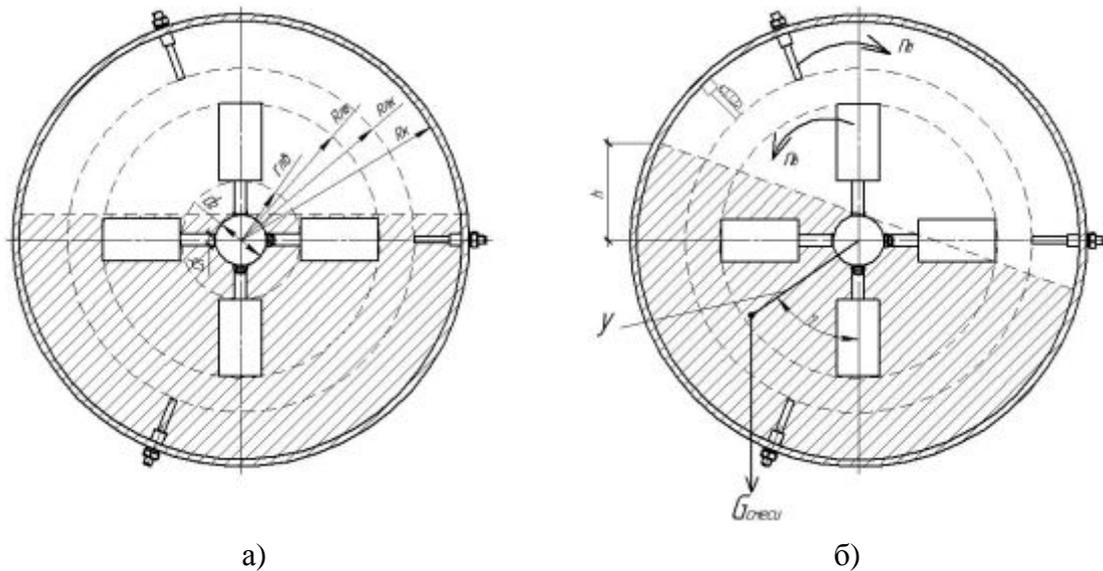


Рис. 4 – Расчетные схемы для определения объема смеси в смесителе: а – первоначальное положение лопаток рабочего органа при $n_k = 0$ и $n_b = 0$; б – корпус смесителя и лопастной вал вращаются.

В окончательном виде формулы для определения производительности бетоносмесителя гравитационно-принудительного действия, при коэффициенте заполнения объема смесителя $\kappa_{30} = 0,5$, имеют вид:

$$P_{\text{экссл}} = \frac{1}{2} [\pi \cdot L_k (R_k^2 \cdot k_o - r_n^2) - \pi \cdot r_n^2 \cdot l_n \cdot z_n - z_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot c_1 - z_2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot c_2] \cdot Z_{\text{ц}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5)$$

$$P_{\text{экссл}} = \frac{1}{2} [\pi \cdot L_k (R_k^2 \cdot k_o - r_n^2) - \pi \cdot r_n^2 \cdot l_n \cdot z_n - z_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot c_1 - z_2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot c_2] \cdot Z_{\text{ц}} \cdot \rho_0, \text{ т/ч}. \quad (6)$$

Таким образом, зависимость (5) позволяет определить производительность бетоносмесителя с учетом количества смеси, находящейся в рабочем пространстве по чисто конструктивным параметрам смесителя, а зависимость (6) – с учетом средней плотности приготавливаемой бетонной смеси.

Производительность комплекта оборудования с учетом работы ленточно-скребкового питателя также может быть определена исходя из зависимостей:

$$P'_{\text{экспл}} = 3600 \cdot B_{\text{ленты}} \cdot h_{\text{скребка}} \cdot \cos\beta_1 \cdot V_{\text{пит}} \cdot \psi_{\text{яч}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (7)$$

$$P'_{\text{экспл}} = 3600 \cdot B_{\text{ленты}} \cdot h_{\text{скребка}} \cdot \cos\beta_1 \cdot V_{\text{пит}} \cdot \psi_{\text{яч}} \cdot \rho_0, \text{ Т/ч}, \quad (8)$$

где $B_{\text{ленты}}$ – ширина ленты питателя, м; $h_{\text{скребка}}$ – высота скребка, м; β_1 – угол наклона питателя; $V_{\text{пит}}$ – скорость ленты питателя, м/с; $\psi_{\text{яч}}$ – коэффициент заполнения ячейки питателя.

Общая мощность технологического комплекта оборудования, (рис. 1):

$$N_{\text{тех.комп.}} = N_{\text{смесителя}} + N_{\text{питателя}}, \text{ кВт} \quad (9)$$

Мощность бетоносмесителя гравитационно-принудительного действия, затрачиваемая на процесс приготовления бетонной смеси, состоит из мощности, необходимой для вращения корпуса смесителя ($N_{\text{корпуса}}$) и мощности, обеспечивающей вращение лопастного вала ($N_{\text{вала}}$), кВт:

$$N_{\text{смесителя}} = N_{\text{корпуса}} + N_{\text{вала}}. \quad (10)$$

Мощность, необходимая для вращения корпуса смесителя, состоит из двух составляющих: мощности, которая тратится на перемещение бетонной смеси во вращающемся корпусе смесителя ($N_{\text{К}}^{(1)}$) и мощности, которая тратится на преодоление сил трения, возникающих при перемещении массы бетонной смеси лопатками корпуса ($N_{\text{К}}^{(2)}$), кВт:

$$N_{\text{корпуса}} = N_{\text{К}}^{(1)} + N_{\text{К}}^{(2)}. \quad (11)$$

Мощность, которая тратится на перемещение смеси во вращающемся корпусе смесителя, определяется согласно формуле, кВт:

$$N_{\text{К}}^{(1)} = \frac{0,85 \cdot G_{\text{см}} \cdot h \cdot Z \cdot n_{\text{к}}}{\eta_{\text{к}} \cdot 1000}, \quad (12)$$

где $G_{\text{см}}$ – вес бетонной смеси, поднимаемой под действием сил трения, Н; h – вертикальная координата смещения массы смеси в корпусе, $h = 0,7 \cdot R_{\text{к}}$, м (рис. 4 б); Z – количество циркуляций смеси в корпусе машины; $n_{\text{к}}$ – частота вращения корпуса смесителя, с^{-1} ; $\eta_{\text{к}}$ – к.п.д. привода корпуса.

Вес бетонной смеси, находящейся в машине, можно определить, зная общий объем смеси (4) с учетом её средней плотности смеси:

$$G_{см} = V_{общ} \cdot \rho_0 \cdot g, \quad (13)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Мощность, которая тратится на преодоление сил трения, возникающих при перемещении массы бетонной смеси по лопаткам корпуса, определяется согласно формуле, кВт:

$$N_K^{(2)} = \frac{F_{тр.к} \cdot V_{абс.к} \cdot z_1}{1000 \cdot \eta_k}, \quad (14)$$

где $F_{тр.к}$ – сила трения материала, возникающая при движении частиц бетонной смеси по поверхности лопатки корпуса смесителя, Н:

$$F_{тр.к} = G_{лоп.корп} \cdot (f_1 \cos \varphi_k + \sin \varphi_k), \quad (15)$$

где $G_{лоп.корп}$ – сила тяжести смеси, которая находится на лопатках корпуса $G_{лоп.корп} = z_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot c_1 \cdot \rho_0 \cdot g$, Н; f_1 – коэффициент трения смеси при движении частиц бетонной смеси по поверхности лопатки корпуса смесителя; φ_k – угол подъема смеси, с которого частицы смеси начинают сходжение с лопатки корпуса.

Абсолютная скорость движения частиц смеси по лопаткам корпуса определяется по формуле:

$$V_{абс.к} = \omega_k R_k \sqrt{2 - \frac{R_{лк}^2}{R_k^2}}, \text{ м/с}, \quad (16)$$

где ω_k – частота вращения корпуса, с⁻¹; $R_{лк}$ – радиус по торцу лопаток корпуса, м.

Мощность, необходимая для работы лопастного вала в процессе перемешивания компонентов бетонной смеси, включает две составляющие: мощности, которая затрачивается на приобретение лопастным валом крутящего момента (N_3) и мощности, которая затрачивается на преодоление сил трения, возникающих при взаимодействия массы бетонной смеси с лопастным валом (N_4), кВт:

$$N_{\text{вала}} = N_B^{(1)} + N_B^{(2)}. \quad (17)$$

Мощность, которая затрачивается на приобретение лопастным валом крутящего момента, можно определить по формуле, кВт:

$$N_B^{(1)} = \frac{M_{\epsilon} \cdot \omega_{\epsilon}}{\eta_B \cdot 1000}, \quad (18)$$

где ω_{ϵ} – частота вращения лопастного вала, с^{-1} ; M_{ϵ} – крутящий момент лопастного вала, Н·м, определяется как:

$$M_{\epsilon} = P_{\text{бс}} \cdot R_{\text{лв}}, \text{ Н·м}, \quad (19)$$

где $P_{\text{бс}}$ – усилие, возникающее при действии бетонной смеси на лопатки лопастного вала, Н:

$$P_{\text{бс}} = q \cdot z_2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot c_2 \cdot \cos \varphi_{\epsilon} \cdot R_{\text{лв.ср}}, \text{ Н}, \quad (20)$$

где q – давление бетонной смеси на лопатку вала, Па:

$$q = C_0 \cdot \rho_0 \cdot V_{\epsilon}, \quad (21)$$

где C_0 – коэффициент сопротивления движению лопатки при взаимодействии с бетонной смесью, $C_0 = 5 \dots 7$; $R_{\text{лв.ср}}$ – средний радиус лопастного вала,

$R_{\text{лв.ср}} = \frac{R_{\text{лв}} + r_{\text{лв}}}{2}$, м; V_{ϵ} – окружная скорость лопастного вала, $V_{\epsilon} = \omega_{\epsilon} \cdot R_{\epsilon}$, м/с.

Мощность, которая затрачивается на преодоление сил трения, возникающих при взаимодействии лопастного вала с бетонной смесью, определяется по формуле, кВт:

$$N_B^{(2)} = \frac{F_{\text{тр.в}} \cdot V_{\text{абс.в}} \cdot z_2}{1000 \cdot \eta_{\epsilon}}, \quad (22)$$

где $F_{\text{тр.в}}$ – сила трения, возникающая при движении частиц бетонной смеси по поверхности лопатки, Н:

$$F_{\text{тр}} = (G_{\text{лоп.вал}} + G'_{\text{лоп.корн}}) \cdot (f \cos \varphi_2 + \sin \varphi_2), \quad (23)$$

где $G_{\text{лоп.вал}}$ – вес смеси, которая находится на лопатках вала при перемешивании ($G_{\text{лоп.вал}} = z_2 \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot c_2 \cdot \rho_0 \cdot g$), Н; $G'_{\text{лоп.корп}}$ – вес смеси, которая сбрасывается с лопаток корпуса на лопатки вала $G'_{\text{лоп.корп}} = \frac{1}{3} z_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot c_1 \cdot \rho_0 \cdot g$, Н; f_1 – коэффициент трения смеси о поверхность лопатки; φ_2 – угол подъема смеси, с которого смесь начинает сходжение с лопатки вала; z_2 – количество лопаток на валу; η_v – к.п.д. привода вала.

Абсолютная скорость движения частиц смеси по лопатке вала может быть представлена зависимостью:

$$V_{\text{абс.в}} = \omega_v R_{\text{лв}} \sqrt{2 - \frac{r_{\text{лв}}^2}{R_{\text{лв}}^2}}, \quad (24)$$

где $R_{\text{лв}}$ – максимальный радиус лопастного вала, м; $r_{\text{лв}}$ – минимальный радиус лопастного вала, м.

Мощность ленточно-скребкового питателя определяется как:

$$N_{\text{питателя}} = (0,003 \cdot P' \cdot h + 0,00015 \cdot P' \cdot l + 0,03 \cdot B_{\text{ленты}} \cdot V_{\text{пит.}} \cdot 1) \cdot K_1 \cdot K_2, \text{ кВт} \quad (25)$$

где P' – производительность питателя, м³/ч; h – высота, на которую транспортируется материал, м; $l = h/\sin \beta$ – длина питателя, м; $B_{\text{ленты}}$ – ширина ленты, м; $V_{\text{пит.}}$ – скорость ленты, м/с; K_1, K_2 – коэффициенты, которые учитывают силу сопротивления соответственно на приводном и натяжном барабанах.

Выводы. Найдены зависимости для определения эксплуатационной производительности и общих затрат мощности технологического комплекта оборудования

Список литературы: 1. Емельянова И.А. Современные строительные смеси и оборудование для их приготовления / И.А. Емельянова, О.В. Доброходова, А.И. Анищенко. – Х.: Гимченко, 2010. – 152 с. 2. Емельянова И.А. Особенности приготовления строительных смесей в смесителях, работающих в каскадном режиме [И.А. Емельянова, В.В. Блажко, А.И. Анищенко и др.] // Вісник НТУ «ХП». – 2011. – № 50. – С. 89 – 97.

Поступила в редколлегию 01.08.12

Определение основных показателей работы технологического комплекса оборудования с бетоносмесителем гравитационно=принудительного действия / И.А. ЕМЕЛЬЯНОВА, А.И. АНИЩЕНКО, А.Н. ПЛУЖНИК, В.Ю. ШЕВЧЕНКО // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 46 – 55. – Библиогр.: 2 назв.

Приведена методика визначення основних показників роботи технологічного комплексу обладнання, що складається з бетонозмішувача гравітаційно-примусової дії та стрічково-скребкового живильника.

A method for determining the basic performance of the techno-sky set of equipment consisting of a mixer gravitational force of the belt and scraper feeder.

УДК 621.926.5:539.215:531.36

К.Ю. ДЕЙНЕКА, магістр, НУВГП, Рівне

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПУЛЬСАЦІЙ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА

Розглянуто перехідні режими руху завантаження під час самозбудження пульсацій в камері стаціонарно обертового барабана. Для візуалізації картин руху в перерізі камери використані розрахункові сітки. На основі аналізу отриманих результатів встановлено умови інтенсифікації прояви пульсацій.

Низька енергетична ефективність барабанних млинів спричинена обмеженістю циркуляції завантаження в обертовій камері. Активізувати процес в млинах традиційних конструкцій дозволяє самозбудження пульсацій [1]. Було одержано умову асимптотичної стійкості усталеного руху млина [2] та умову стійкості течії зернистого внутрішньокамерного завантаження [3].

Чинниками нестійкості є варіації моменту інерції, моменту опору обертанню барабана та дилатансія або розпорошення завантаження [4 – 6].

Відомий теоретичний метод розрахунку змінного моменту інерції завантаження [7, 8] не відповідає фізичній сутності задачі, оскільки враховує лише його «приєднану» до барабана частину.

Натомість було розроблено метод розрахунку інерційних параметрів завантаження при візуалізації картин руху в поперечному перерізі обертової

камери [9].

Залучення принципу твердіння механічної системи [10, 11] дозволило суттєво спростити задачу завдяки врахуванню всієї маси завантаження – як «приєднаної», так і «відокремленої».

За мету роботи було поставлено визначення динамічних характеристик перехідних режимів руху завантаження в стаціонарно обертовій камері для оцінювання їх впливу на умови самозбудження та розвитку пульсацій.

При візуальному аналізі картин руху завантаження було застосовано двовимірні аналоги динамічних параметрів у безрозмірній формі.

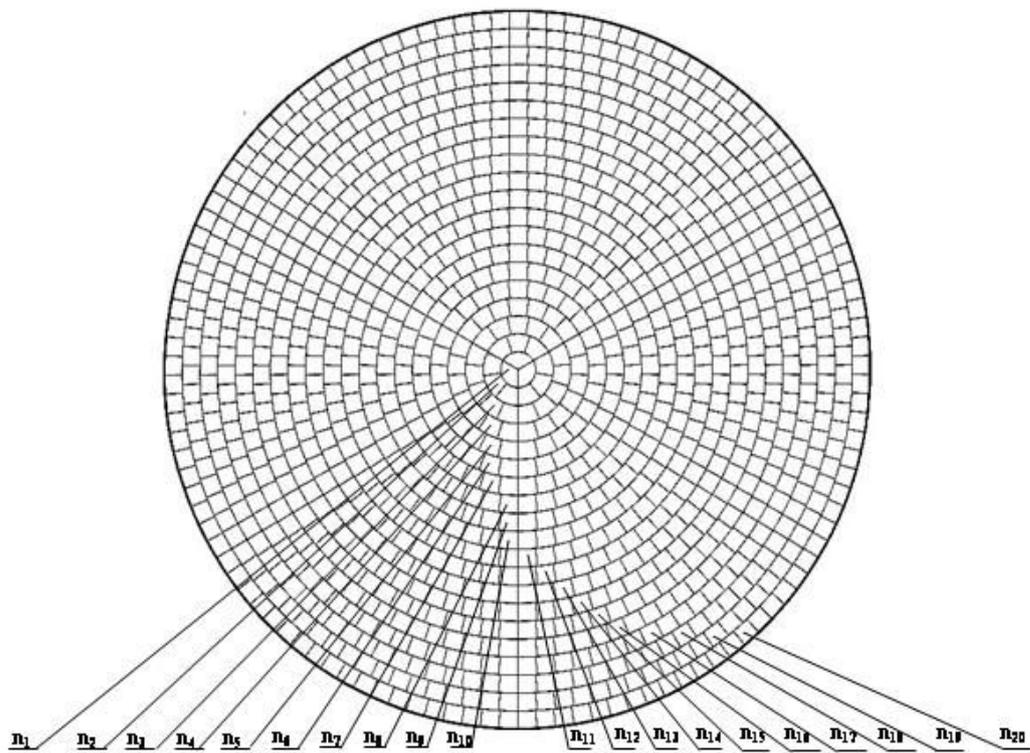
Осьовий, або його аналог полярний, момент інерції кількісно оцінювався за відношенням його до значення моменту при повному заповненні камери ψ_{i1} ($\kappa = 1$), а якісно – за відношенням до моменту для пристінкового шару завантаження $\psi_{i\infty}$ при поточному κ : $\psi_{i1} = 2I_{p\bar{\sigma}}/\pi$, $\psi_{i\infty} = 2I_{p\bar{\sigma}}/\left\{\pi\left[1 - (1 - \kappa)^2\right]\right\}$, де $I_{p\bar{\sigma}}$ – безрозмірний полярний момент інерції фігури завантаження, κ – ступінь заповнення камери завантаженням.

Момент опору, або його аналог статичний момент, кількісно оцінювався за відношенням його до значення умовного максимального моменту при половинному заповненні камери $\psi_{m0,5}$ ($\kappa = 0,5$), а якісно – за відношенням до умовного максимального моменту ψ_{mc} при поточному κ : $\psi_{m0,5} = 3S_{y\bar{\sigma}}/2$, $\psi_{mc} = 3S_{y\bar{\sigma}}/(2\sin^3\alpha)$, де $S_{y\bar{\sigma}}$ – безрозмірний статичний момент фігури перерізу завантаження, α – половина центрального кута сегментного перерізу завантаження. Умовний максимальний момент відповідає розподілу завантаження в перерізі камери у вигляді ідеального твердотілого сегмента, що повернуто разом із барабаном зі стану спокою на прямий кут.

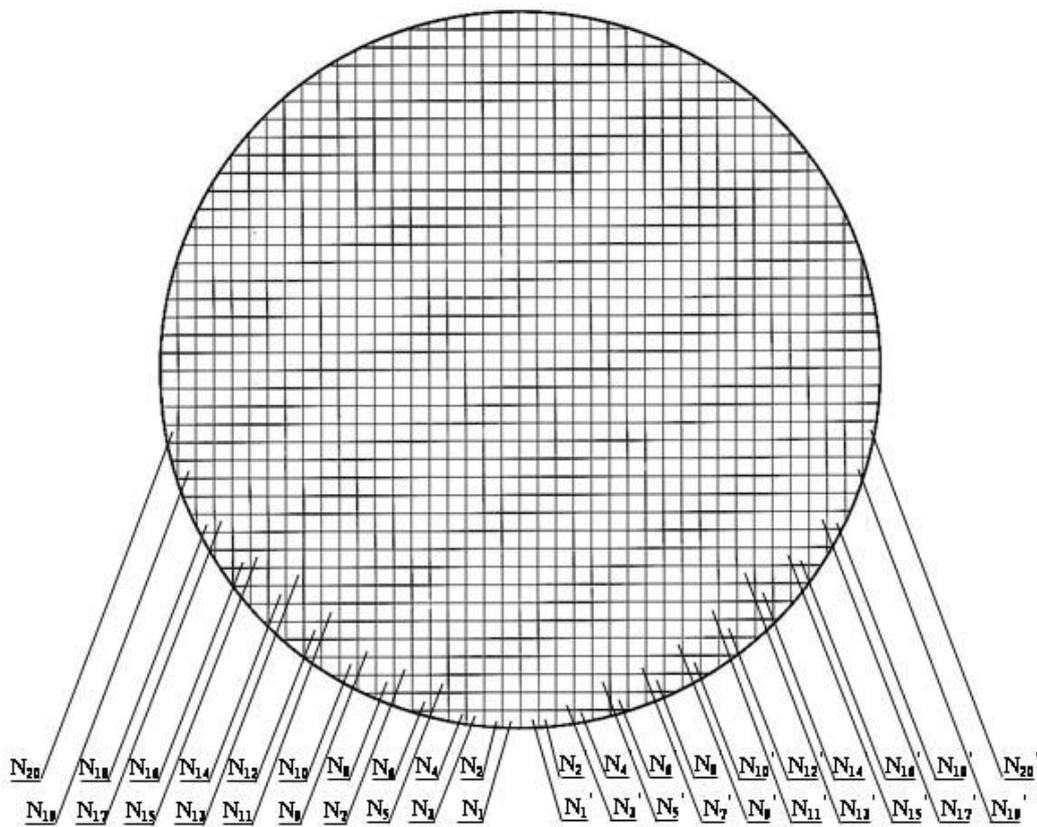
Дилатансія завантаження в камері оцінювалась за відношенням поточного заповнення площі перерізу камери до повної площі цього перерізу при поточному κ : $\nu = F_{\bar{\sigma}}/(\pi\kappa)$, де $F_{\bar{\sigma}}$ – поточне значення безрозмірної заповненої площі. Для визначення моменту інерції використовувалась розрахункова сітка із концентричним розташуванням комірок у вигляді кільцевого сектора (рис. 1 (1)), а моменту опору – сітка із рядним розташуванням квадратних комірок (рис. 1 (2)).

Для визначення дилатансії застосовувались обидві сітки.

Число кільцевих шарів комірок першої сітки (n_{20}) та половина числа вертикальних шарів комірок другої (N_{20} та N'_{20}) було прийнято рівним 20. Загальне число комірок у кожній сітці становило біля 1200.



1



2

Рис. 1 – Схеми розрахункових сіток: 1 – із концентричним, 2 – із рядним розташуванням шарів комірок

Молольне завантаження моделювалось зернистим матеріалом із розміром елементів $d = 2,2$ мм.

Як подрібнюваний матеріал застосовувався цемент. Було використано камеру без виступів діаметром $D = 212$ мм та довжиною 100 мм.

Співвідношення $d/D \approx 0,01$ відповідає умовам роботи трубних млинів.

Для візуалізації руху використовувалась цифрова відеозйомка.

Фіксувались картини перехідного режиму періодичного руху завантаження під час пульсацій.

Зображення картин покривалось розрахунковими сітками і лічилося кількість заповнених комірок. Було оброблено 104 картини руху.

На рис. 2 зображено отримані послідовні картини руху завантаження для одного періоду коливань при $\kappa = 0,15 - 0,5$.

Пульсації виникали у діапазоні відносної швидкості обертання $\psi_\omega = \omega/\omega_{кр} = 0,85 - 1,15$, нижня межа якого зменшувалась із посиленням демпфуючого впливу подрібнюваного матеріалу при збільшенні його вмісту у завантаженні. Тривалість періоду коливань завантаження в камері становила біля 0,5 с. Частота коливань у 1,05 – 1,3 рази перевищувала частоту обертання і зростала зі зменшенням заповнення камери.

Пульсації завантаження спостерігались при ступені заповнення камери $\kappa \geq 0,15$, а упевнений пульсаційний рух виникав при $\kappa \geq 0,25$.

На рис. 3 наведено графіки розрахованих залежностей ψ_{i1} , $\psi_{i\omega}$, $\psi_{m0,5}$, ψ_{mc} та v від ψ_ω на протязі одного періоду пульсацій завантаження для восьми ступенів заповнення камери $\kappa = 0,15, 0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4, 0,45$ та $0,5$; де t – час, t_n – тривалість періоду коливань. При обчисленні моментів враховувалась похибка, зумовлена дилатансією завантаження у камері барабана.

Порівняльний аналіз картин руху та графічних залежностей засвідчує істотне зростання амплітуди коливань координат елементів, положення вільної поверхні завантаження та моментів інерції, опору і дилатансії зі зменшенням ступеня заповнення камери.

Таким чином, пульсації внутрішньокамерного завантаження барабанних млинів виникають переважно у режимі руху із повним підкиданням його елементів.

Інтенсивність пульсаційного руху суттєво посилюється зі зменшенням ступеня заповнення камери та збільшенням вмісту подрібнюваного матеріалу у завантаженні. Частота автоколивань завантаження дещо перевищує частоту обертання барабана.

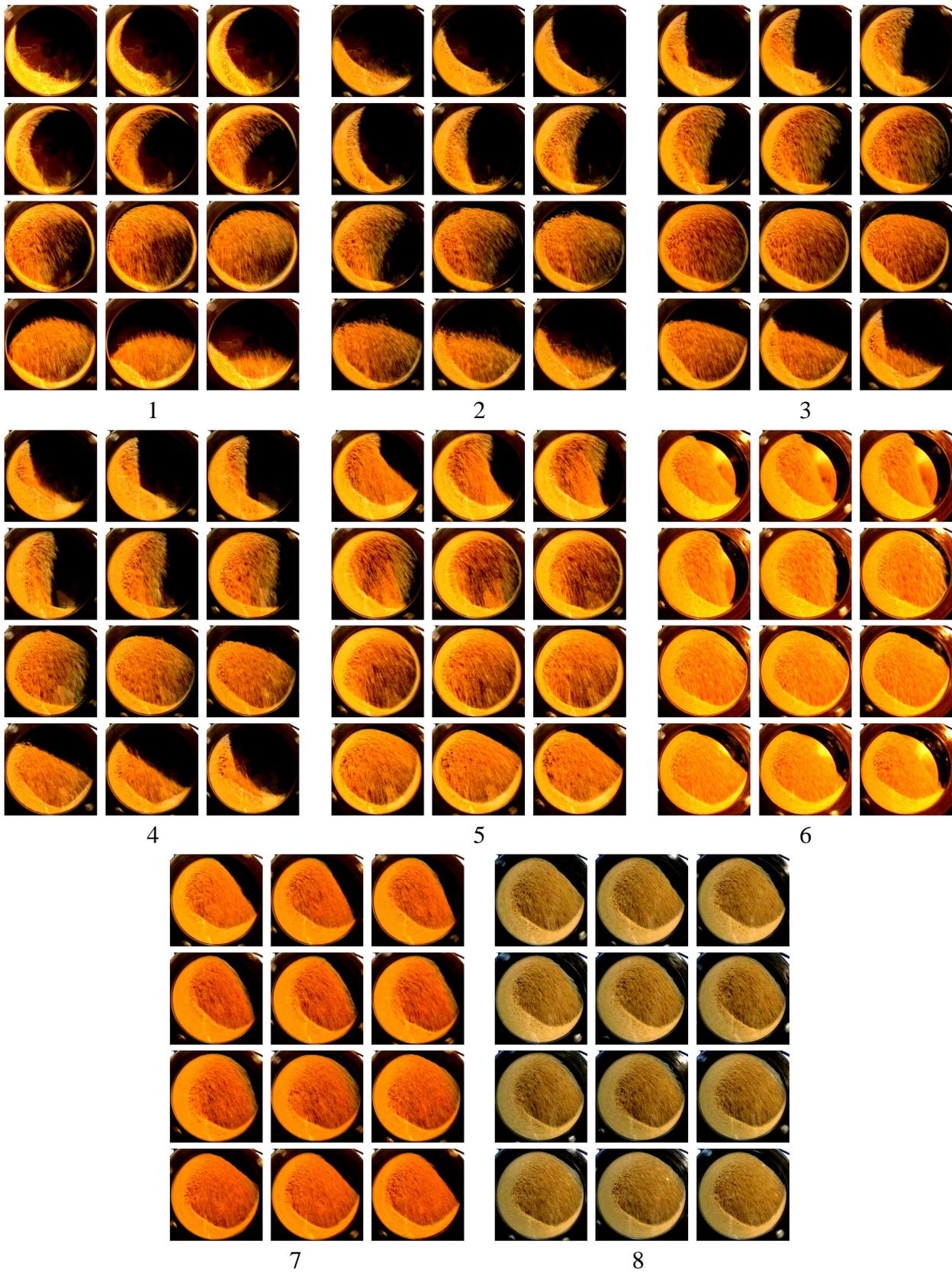
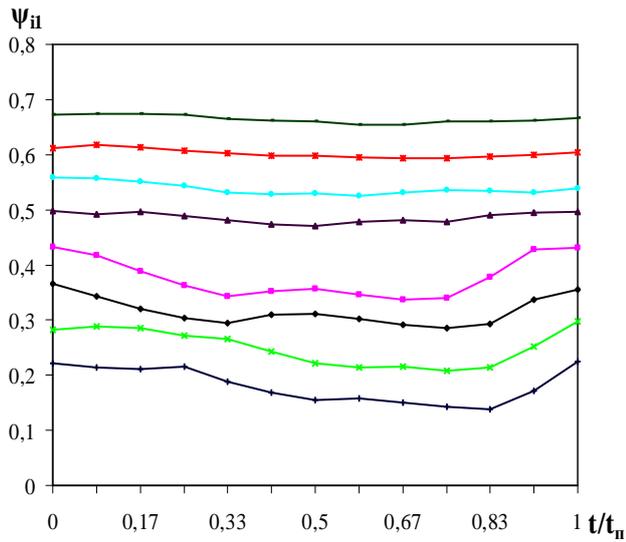
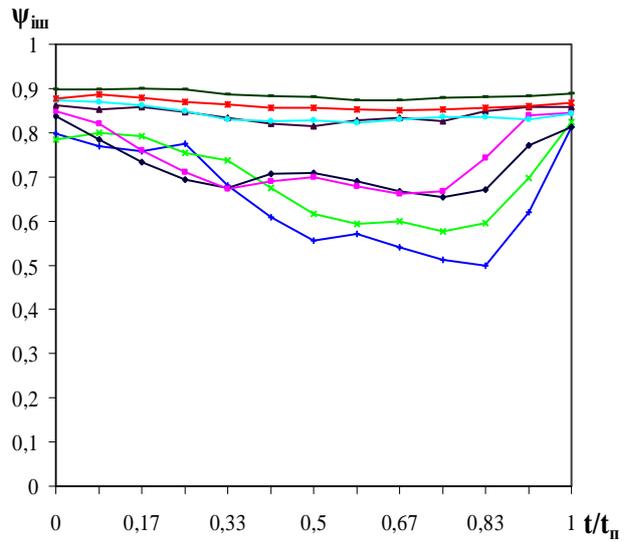


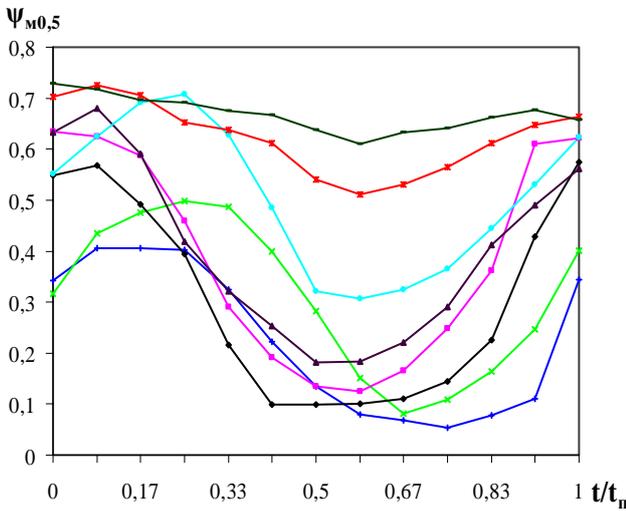
Рис. 2 – Послідовні картини руху завантаження для одного періоду пульсацій:
 1 – $\kappa = 0,15$; 2 – $\kappa = 0,2$; 3 – $\kappa = 0,25$; 4 – $\kappa = 0,3$; 5 – $\kappa = 0,35$; 6 – $\kappa = 0,4$; 7 – $\kappa = 0,45$;
 8 – $\kappa = 0,5$



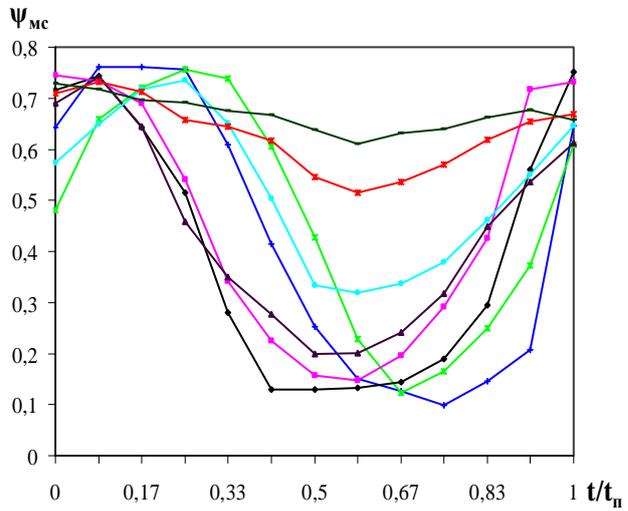
1



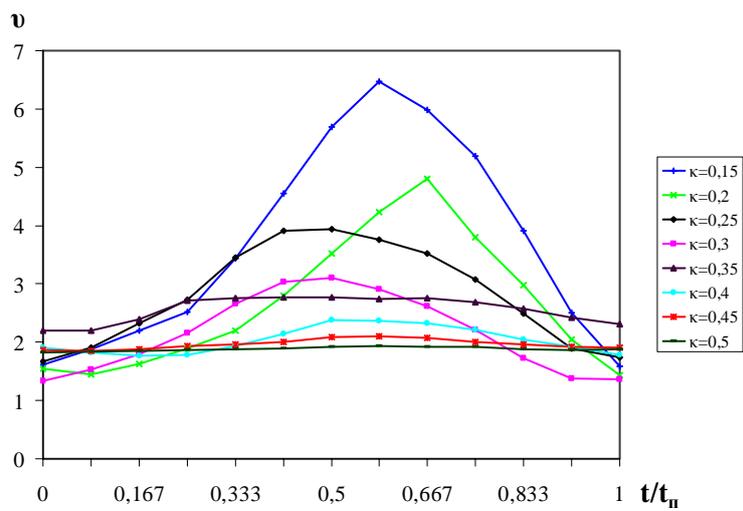
2



3



4



5

Рис. 3 – Залежності ψ_{il} (1), ψ_{iii} (2), $\psi_{M0,5}$ (3), ψ_{Mc} (4) та v (5) від ψ_{ω} для одного періоду пульсацій завантаження при $\kappa = 0,15 - 0,5$

Список літератури: 1. Пат. 7180 України, МПК В 02 С 17/00. Спосіб подрібнення сипкого матеріалу в барабанному млині / *Науменко Ю.В., Науменко К.Ю.* – № u20041008352; заявл. 14.10.04; опубл. 15.06.05, Бюл. № 6. 2. *Науменко К.Ю.* Нестійкі режими обертання барабаних млинів / *К.Ю. Науменко* // Вісник НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2006. – Вип. 2 (34), Ч. 2. – С. 111 – 119. 3. *Дейнека К.Ю.* Стійкість руху внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / *К.Ю. Дейнека* // Вісник НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 3 (43). – С. 250 – 257. 4. *Дейнека К.Ю.* Создание рациональных режимов работы барабанных мельниц с автоколебательной внутрикамерной загрузкой / *К.Ю. Дейнека* // Вісник НТУ«ХП». – 2010. – № 65. – С. 69 – 74. 5. *Дейнека К.Ю.* Створення раціональних режимів роботи барабаних млинів із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням / *К.Ю. Дейнека* // Вісник КНУ ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2011. – Вип. 3 (68), ч. 1. – С. 93 – 95. 6. *Дейнека К.Ю.* Встановлення умов самозбудження пульсацій внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / *К.Ю. Дейнека* // Вісник НТУ«ХП». – 2011. – № 50. – С. 72 – 79. 7. *Крюков Д.К.* Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий / *Д.К. Крюков.* – М.: Недра, 1966. – 174 с. 8. *Крюков Д.К.* Маховой момент шаровых мельниц / *Д.К. Крюков* // Изв. вузов. Горн. журн. – 1958. – № 2. – С. 131 – 134. 9. *Науменко К.Ю.* Застосування методу візуалізації для визначення змінних інерційних параметрів внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / *К.Ю. Науменко* // Вісник НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вип. 4 (40). – Ч. 3. – С. 9 – 16. 10. *Новоселов В.С.* Аналитическая механика систем с переменными массами / *В.С. Новоселов.* – Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. – 240 с. 11. *Бессонов А.П.* Основы динамики механизмов с переменной массой звеньев / *А.П. Бессонов.* – М.: Наука, 1967. – 279 с.

Надійшла до редколегії 20.08.12

УДК 621.926.5:539.215:531.36

Візуалізація пульсацій внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / К.Ю. ДЕЙНЕКА // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 55 – 61. – Бібліогр.: 11 назв.

Рассмотрены переходные режимы движения загрузки во время самовозбуждения пульсаций в камере стационарно вращающегося барабана. Для визуализации картин движения в сечении камеры использованы расчетные сетки. На основе анализа полученных результатов установлены условия интенсификации проявления пульсаций.

The transient granular filling flow in the process of self-excitation of its fluctuations in a stationary rotating drum chamber is considered. The design-basis graticules were used for cross-section flow patterns visualization. The rises of the rate of pulsations conditions are established on the basis of examination of the data were determined.

О.І. ЗЕЛЕНСЬКИЙ, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,
ДП «УХІН», Харків

ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ДОМЕННОГО КОКСУ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОПОРОШКІВ КАРБІДУ КРЕМНІЮ

У статті наводяться результати досліджень щодо поліпшення якості доменного коксу за показниками CRI/CSR при введенні мікропорошку карбіду кремнію чорного у вугільну шихту для коксування. Показано, що добавки карбіду кремнію (до 1 % від маси шихти) є ефективними об'ємно-модифікуючими присадками для виробництва доменного коксу.

Вступ.

В даний час головним споживачем коксу є доменне виробництво, де щорічно використовується близько 14 млн. т коксу (78 % загального обсягу, або 86 % класу крупністю більше 25 мм). Витрата коксу на виплавку чавуну в Україні у середньому складає до 450 кг/т [1], провідні виробники інших країн знизили ці витрати до рівня 300 – 350 кг/т.

Питома витрата коксу в Україні значно вище, що погіршує економіку виплавки чавуну, тому що кокс є найдорожчим компонентом доменної шихти. Тому провідні виробники до 40 % коксу замінюють додатковими паливами, перш за все пиловугільним.

Пиловугільне паливо, як і інші замінники коксу, можуть частково заміщати його як відновник заліза з руди і джерело тепла для здійснення фазових переходів в доменній плавці. Кокс як розпушувач засипу замінити нічим.

Це єдиний матеріал, який залишається у твердій фазі на нижніх горизонтах доменної печі, що утримує на собі вагу всіх вищерозміщених матеріалів і забезпечує газопроникність засипу. В свою чергу, скорочення витрат коксу неможливо без поліпшення його якості, зокрема, зниження реакційної здатності та підвищення міцності.

Заміна в доменній печі частини коксу на пиловугільне паливо ставить нові вимоги до його якості. В даний час до основних показників якості коксу відносять вологість, сірчистість, зольність, механічну міцність, а також індекс реакційної здатності (CRI – Coke Reactivity Index) і міцність залишку коксу після реакції з CO₂ (CSR – Coke Strength after Reaction).

© О.І. Зеленський, 2012

Вимоги металургійних заводів до якості доменного коксу за цими показниками дуже високі ($CRI \leq 30 \%$; $CSR \geq 60 \%$) [2].

Для досягнення необхідного рівня показників якості доменного коксу, коксохімічні заводи повинні використовувати високоякісне коксівне вугілля з певним петрографічним, мінеральним складом і дуже низьким вмістом сірки [3, 4].

Проведені в УХІНі дослідження вітчизняного шахтного фонду коксівного вугілля показали, що вугільна сировинна база України дозволяє отримувати доменний кокс з показниками $CRI \leq 35 \%$ і $CSR \geq 50 \%$ в обсязі всього лише 3,5 – 4,0 млн. тонн на рік. Решта коксівного вугілля, що видобувається в Україні, має великий вміст сірки та в середньому дозволяє отримувати кокс з показниками CRI і CSR в межах 40 %.

Тому, для отримання доменного коксу з необхідними якісними показниками, за наявної вугільної бази, коксохіміки розробляють і використовують різні способи та прийоми, що дозволяють поліпшити ті чи інші параметри його якості. До одних з таких способів відноситься цілеспрямоване регулювання якості коксу шляхом введення до вугільної шихти неспікливих добавок: коксового пилу та дріб'язку, антрациту, напівкоксу, а також неорганічних добавок (дрібнодисперговані оксиди титану, залізу та алюмінію) [5, 6].

В даній роботі була поставлена задача щодо можливості застосування мікропорошків карбїду кремнію, як добавок до вугільних шихт для виробництва доменного коксу.

Експериментальна частина.

Для досліджень використовували мікропорошок карбїду кремнію чорного марки 53С. Попередньо карбїд кремнію подрібнювали у вібротліні протягом 2 годин до розміру часток ≤ 12 мкм. Отриманий вібротлений порошок карбїду кремнію додавали до вугільної шихти у кількості 0,25 – 1,0 мас. % шляхом механічного змішування. Властивості шихти та марочний склад наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика експериментальної вугільної шихти

Марочний склад, %				Технічний аналіз, %				Ступінь подрібнення (вміст класу 0 – 3 мм), %
К	Ж	Г	ПС	Волога, W^r	Зола, A^d	Вихід летких речовин, V^{daf}	Сірка S_t^d	
28	25	37	10	10,2	7,8	29,4	1,12	75,5

Вугільну шихту з добавками мікропорошку карборунду завантажували в металеві перфоровані ящики розміром 200 × 200 × 320 мм (маса завантаження 8 кг) і коксували у промисловій печі на батареї № 7 ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС». Період коксування становив 15⁴⁵ годин.

Після завершення процесу коксування ящики вивантажувалися разом з основною масою коксу для мокрого гасіння і далі витягувалися з рампи.

Результати та їх обговорення.

Отримані таким чином кокси досліджувалися на показники якості коксу реакційну здатність (CRI) і міцність коксу після реакції з CO₂ (CSR) за ДСТУ 4703:2006. Результати досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Показники CRI/CSR отриманих коксів

№	Вміст мікропорошку, %	CRI, %	CSR, %
1	0	44,3	29,6
2	0,25	38,8	37,8
3	0,5	37,4	40,9
4	1	41,7	28,1

Більш наочно динаміка впливу кількості мікропорошку карборунду на якість коксу представлена на рис. 1 та рис. 2.

Таким чином, проведені дослідження показали, що оптимальна кількість добавки мікропорошку карбїду кремнію чорного у вугільну шихту становить 0,5 % за масою.

При такому рівні добавки спостерігається зниження показника CRI на 6,9 % та підвищення показника CSR на 11,3 %.

Додавання мікропорошку у кількості 1 % починає призводити до погіршення показників коксу CRI/CSR, а також відчутньо збільшувати його зольність, що також негативно позначається на якості доменного коксу.

Передбачається, що зерна мікропорошку карбїду кремнію, які рівномірно розподілені по всьому об'єму вугільної шихти, виступають в якості «зародків» кристалізації в рідиноподвіжній вугільній масі (при 400 – 500 °С) на стадії пластичного стану, тобто ініціюють утворення в коксі додаткових анізотропних (високовпорядкованих) ділянок, що відрізняються низькою реакційною здатністю.

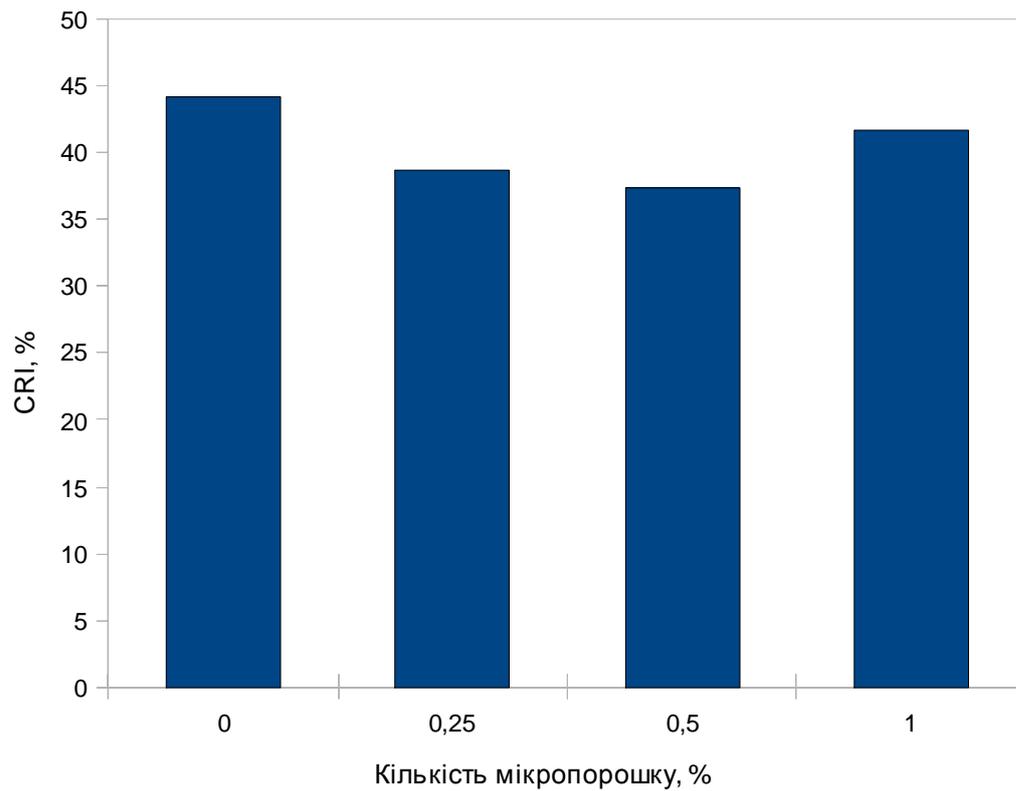


Рис. 1 – Залежність зміни показника CRI від кількості карборундового мікропорошку

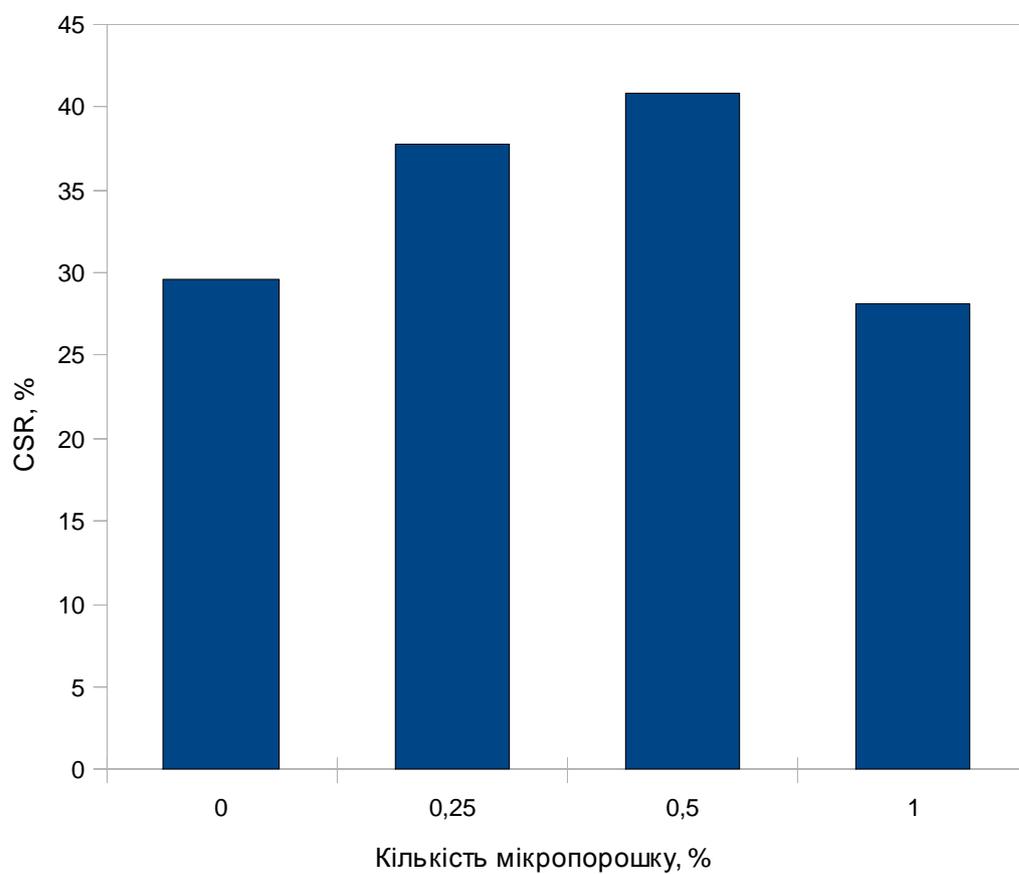


Рис. 2 – Залежність зміни показника CSR від кількості карборундового мікро порошку

Висновки.

Проведені дослідження показали, що вібромелені мікропорошки карбиду кремнію чорного можуть застосовуватися у виробництві доменного коксу в якості об'ємно-модифікуючих присадок. Оптимальна кількість такої присадки у вугільній шихті становить 0,5 мас. %.

Список літератури: 1. Ноздрачев В.А. Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива / В.А. Ноздрачев, С.Л. Ярошевский, В.П. Терещенко. – Донецк: Новый мир, 1996. – 173 с. 2. Филатов Ю.В. Теория и практика производства и применения доменного кокса улучшенного качества: монография / [Ю.В. Филатов, Е.Т. Ковалев, И.В. Шульга и др.]; под. ред. С.Л. Ярошевского. – Киев: Наукова думка, 2011. – 128 с. 3. Рыщенко А.И. Влияние свойств углей на реакцию способность и послереакционную прочность кокса / [А.И. Рыщенко, И.В. Шульга, Д.В. Мирошниченко и др.] // УглеХимический журнал. – 2009. – № 5 – 6. – С. 17 – 22. 4. Давидзон О.Р. Наукове обґрунтування раціонального використання низько відновленого вугілля Донбасу для виробництва високоякісного коксу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.07. «Химия и технология топлив и специальных продуктов» / О.Р. Давидзон. – Х.: УХІН, 2008. – 20 с. 5. Русьянова Н.Д. Углекимия: монография / Н.Д. Русьянова. – М.: Наука, 2000. – 316 с. 6. Климовицкая А.Б. Угольные шихты для коксования и добавки к ним / [А.Б. Климовицкая, Г.Е. Бородина, Г.И. Пивень и др.] // Кокс и химия. – 1989. – № 6. – С. 9 – 11.

Надійшла до редколегії 27.08.12

УДК 66.092.89

Поліпшення якості доменного коксу за допомогою мікропорошків карбиду кремнію / О.І. ЗЕЛЕНСЬКИЙ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 62 – 66. – Бібліогр.: 6 назв.

В статье приводятся результаты исследований по улучшению качества доменного кокса по показателям CRI/CSR при введении микропорошка карбида кремния черного в угольную шихту для коксования. Показано, что добавки карбида кремния (до 1 % от массы шихты) являются эффективными объемно-модифицирующими присадками для производства доменного кокса.

The paper presents results of research to improve the quality metallurgical coke on indicators the CRI / CSR with the introduction of additives the micropowders silicon carbide black to the coal charge for coking. It is shown that the addition of silicon carbide (up to 1% by weight of the charge) are effective volume-modifying additives for the production of metallurgical coke.

В.В. ИВЖЕНКО, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудн.,

ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев,

В.А. ПОПОВ, вед. инж., ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев,

Г.Ф. САРНАВСКАЯ, вед. инж., ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН
Украины, Киев,

Л.Д. ЧУЙКО, инж., ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев;

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАСС НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ НИТРИДОВ КРЕМНИЯ И АЛЮМИНИЯ

Приведены результаты технологического исследования влияния состава термопластичных масс на основе порошков нитрида алюминия, нитрида кремния и парафина, параметров инъекционного литья на выход годных заготовок изделий.

Введение. Технологию инъекционного формования (ИФ) изделий из керамических и металлокерамических материалов все шире используют в промышленности индустриально развитых стран и она наиболее эффективна при производстве деталей сложных форм. Суть этой технологии заключается в получении термопластичных литейных систем из порошков тугоплавких соединений в смеси с органическими связующими и последующем заливании этих систем в металлические формы под давлением 10 – 50 МПа с помощью машин инъекционного литья плунжерного или шнекового типа. Заготовки подвергают термической обработке для удаления связующего и спеканию при предусмотренной температуре [1]. Благодаря применению повышенного давления при формовании технология ИФ обеспечивает получение изделий наиболее сложных форм и значительно увеличивает выход годных изделий за счет уменьшения количества дефектов в виде раковин, пор и повышения механических свойств материала заготовки и изделия.

Цель настоящей работы – исследовать взаимосвязь эффективного градиента температуры при инъекционном литье термопластичных масс на основе порошков нитрида кремния, нитрида алюминия, парафина и их состава, давления инъектирования, формы изделия. Эта работа является развитием ранее проведенных в ИСМ НАН Украины исследований инъекционного формова-

ния изделий из технической керамики [2 – 4].

Методика эксперимента. Для исследований использовали:

- шихту на основе порошка нитрида алюминия печного синтеза (Донецкий завод химических реактивов, Украина) со средним размером частиц 1,2 мкм и удельной поверхностью 4,2 м²/г; для активации спекания нитрида алюминия в шихту вводили 5 % (по массе) оксида иттрия;

- шихту на основе порошка нитрида кремния, полученного методом СВС (Макеевский филиал ОКТЬБ ИПМ НАН Украины), со средним размером частиц 1,3 мкм и удельной поверхностью 6,2 м²/г; для активации спекания нитрида кремния в шихту вводили 7 % (по массе) оксида магния.

В работе использовали термопластичное связующее на основе парафина и пчелиного воска.

Соотношение компонентов составляло 94 % (по массе) парафина и 6 % (по массе) пчелиного воска. Инжектирование при давлении 2,0 – 9,5 МПа проводили на установке для инжекционного литья термопластичных масс, имеющей систему вакуумирования рабочего объема [5], при давлении 0,5 МПа – на установке для горячего шликерного литья. При этом использовали формы для получения пластин размером 32 × 45 × 6,3 мм и сопла для аргоно-дуговой сварки (АДС, рис. 1).



Рис. 1 – Сопло для аргоно-дуговой сварки

Результаты исследований и их обсуждение. В результате технологических исследований установлено, что при температуре в рабочем цилиндре ниже 60 °С и при давлениях 0,5 – 9,5 МПа инжектирование термопластичной массы в пресс-форму не происходит. При температуре выше 82 °С в питателе установки значительно вспучивается масса. В этой связи исследования проводили в интервале температур 60 – 82 °С.

На рис. 2 представлены зависимости минимальной температуры инжек-

тирования, при которой происходит бездефектное формирование заготовок, от концентрации связующего в порошковой системе 95 мас. % AlN – 5 мас. % Y₂O₃ при литье пластин и сопел для АДС.

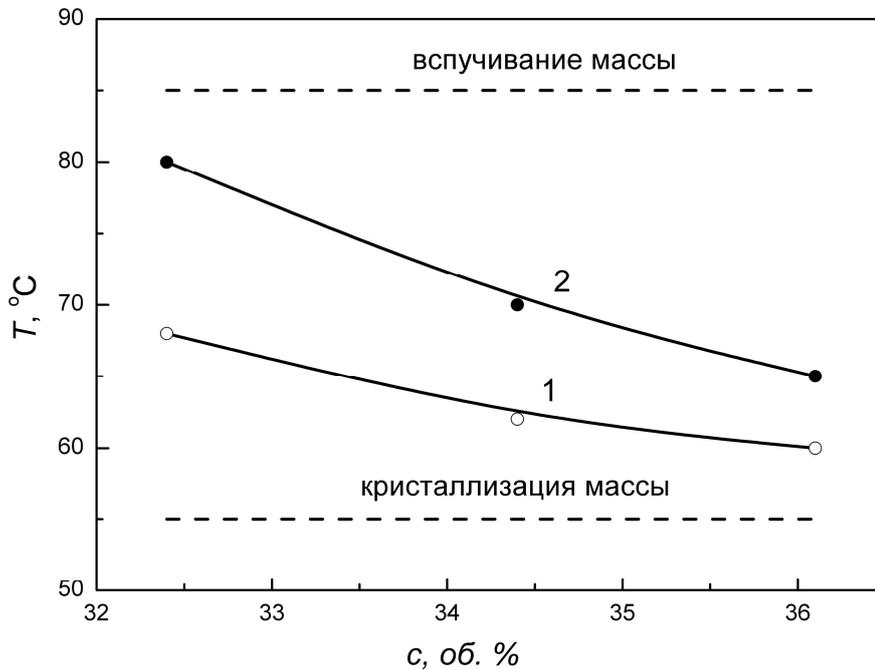


Рис. 2 – Зависимость минимальной температуры процесса от концентрации связующего в порошковой системе 95 мас. % AlN – 5 мас. % Y₂O₃ при литье заготовок пластин 32 × 45 × 6,3 мм (1) и заготовок сопел для АДС (2)

Термопластичная масса с концентрацией связующего 36,1 об. % инжектируется без видимых дефектов при литье заготовок пластин при температуре процесса 60 – 82 °С, заготовок сопел – при температуре 65 – 82 °С. При уменьшении концентрации связующего до 32,4 об. % (при увеличении вязкости массы с 14 до 26 Па·с) эффективный интервал температуры инжектирования уменьшается до 68 – 82 °С при литье пластин и 80 – 82 °С при литье сопел.

При увеличении давления формования с 0,5 до 2,0 – 9,5 МПа эффективность процесса увеличивается и инжектирование массы в камеру пресс-формы происходит при температурах выше 60 °С, однако наблюдается неполное заполнение полости формы или неслияние потоков литейной системы.

Аналогичные результаты получены при исследовании процесса инъекционного литья термопластичных масс на основе порошка нитрида кремния с концентрацией связующего 45,1; 42,8 и 42,1 %.

На рис. 3 представлены зависимости минимальной температуры инжектирования от концентрации связующего в порошковой системе 93 масс. % Si_3N_4 – 7 масс. % MgO при литье пластин и сопел для АДС.

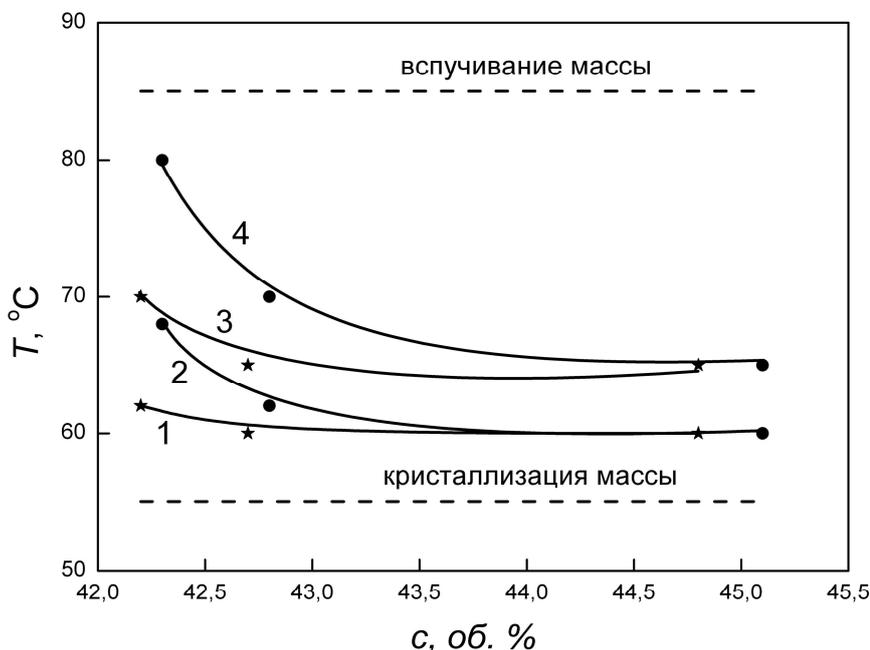


Рис. 3 – Зависимость минимальной температуры процесса от концентрации связующего в порошковой системе 93 масс. % Si_3N_4 – 7 масс. % MgO при литье модельных образцов (пластины $32 \times 45 \times 6,3$ мм): 1, ξ – масса с агломерированными образованиями частиц порошка; 2, \bullet – масса на основе шихты 93 масс. % Si_3N_4 – 7 масс. % MgO ; при литье заготовок сопел для АДЗ: 3, ξ – масса с агломерированными образованиями частиц порошка; 4, \bullet – масса на основе шихты 93 масс. % Si_3N_4 – 7 масс. % MgO .

При литье заготовок пластин эффективный интервал температуры инжектирования уменьшается с 60 – 82 до 68 – 82 °C при уменьшении концентрации связующего на 3,0 об. % (при увеличении вязкости термопластичной массы с 15 до 25 Па·с). При литье заготовок сопел эффективный интервал температуры инжектирования уменьшается с 70 – 82 до 80 – 82 °C.

На основе полученных результатов можно сделать вывод: основными параметрами, определяющими эффективность инъекционного литья являются температура процесса, вязкость термопластичной массы и, в меньшей степени, давление формования.

При исследовании процесса инжектирования термопластичной массы на основе порошка нитрида кремния с агломерированными образованиями частиц порошка, имеющей вязкость 16 – 18 Па·с, установлено, что эффективный

интервал температуры инжектирования увеличивается (рис. 3, кривые 1, 3).

Уменьшение вязкости массы с 20 Па·с (концентрация связующего 42,8 об. %) до 16 Па·с (агломерированные образования частиц порошка, концентрация связующего 42,7 об. %) обеспечивает прохождение процесса инъекционного литья заготовок пластин при температуре 60 °С и давлении 0,5 МПа, а заготовок сопел – при температуре 65 °С и давлении 0,5 МПа.

Уменьшение вязкости массы с 25 Па·с (концентрация связующего 42,1 об. %) до 18 Па·с (агломерированные образования частиц порошка, концентрация связующего 42,2 об. %) обеспечивает прохождение процесса литья заготовок пластин при температуре 62 °С и давлении 0,5 МПа, заготовок сопел – при температуре 70 °С и давлении 0,5 МПа.

На рис. 4 представлены зависимости минимальной температуры инжектирования от вязкости массы при литье заготовок пластин и сопел из термопластичных масс на основе нитрида алюминия и нитрида кремния.

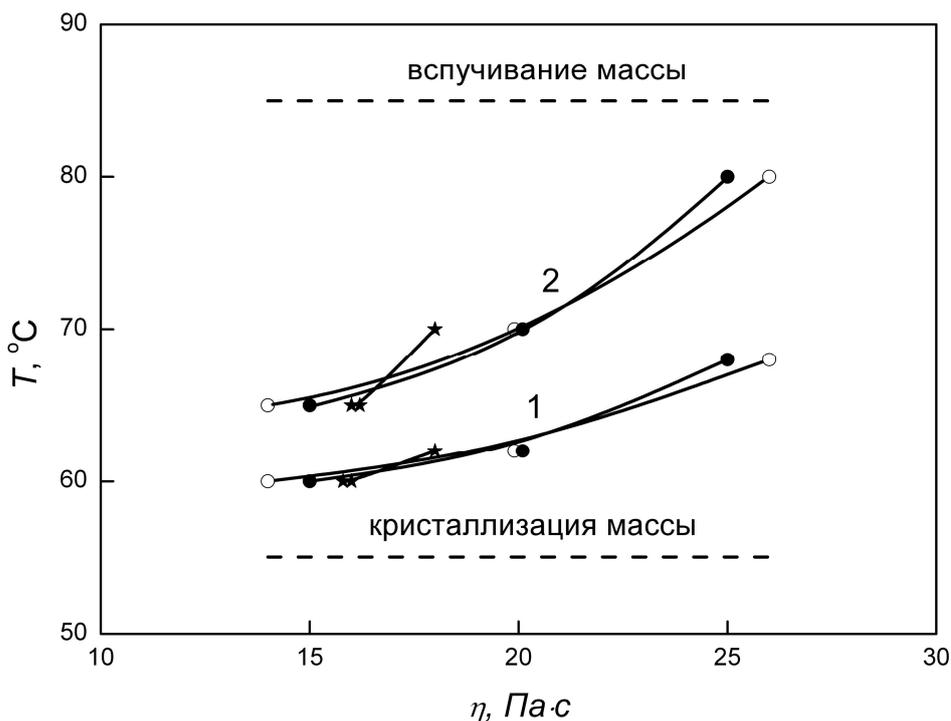


Рис.4. Зависимость минимальной температуры процесса от вязкости массы при литье заготовок пластин 32 × 45 × 6,3 мм (1) и заготовок сопел (2): ○ – масса на основе шихты 95 масс. % AlN – 5 масс. % Y₂O₃, ● – масса на основе шихты 93 масс. % Si₃N₄ – 7 масс. % MgO, ★ – масса с агломерированными образованиями частиц порошка Si₃N₄ – MgO.

Эффективный интервал температуры инжектирования уменьшается с

60 – 82 °С до 68 – 82 °С (при литье пластин) и с 65 – 82 °С до 80 – 82 °С (при литье сопел) при увеличении вязкости массы с 14 до 26 Па·с и не зависит от состава термопластичной массы.

Уменьшение эффективного интервала температуры инжектирования для заготовок сопел (кривые 2) по сравнению с заготовками пластин (кривые 1) связано с тонкостенностью изделия, что приводит к высоким скоростям охлаждения термопластичной массы.

Выводы.

Основными параметрами, которые определяют эффективный интервал температуры инжектирования, являются вязкость термопластичной массы и, в меньшей степени, давление формования.

Эффективный интервал температуры инжектирования уменьшается с 60 – 82 °С до 68 – 82 °С, а в тонкостенных изделиях – с 65 – 82 °С до 80 – 82 °С при увеличении вязкости с 14 до 26 Па·с.

При использовании термопластичной массы с агломерированными образованиями частиц порошка нитрида кремния при концентрации связующего 42,1 – 42,2 об. % эффективный интервал температуры инжектирования увеличивается вследствие уменьшения вязкости массы с 25 до 18 Па·с с 68 – 82 °С до 62 – 82 °С, а при инжектировании тонкостенных изделий – с 80 – 82 °С до 70 – 82 °С.

Список литературы: 1. *Beebhas C. Mutsuddy. Injection molding / Beebhas C. Mutsuddy // Ceramic and Glasses. – 1991. – Vol. 4. – P. 173 – 180.* 2. *Новиков Н.В. Экспериментальные исследования и моделирование инжекционного литья изделий сложных форм из технической керамики / [Н.В. Новиков, В.В. Ивженко, А.А. Лещук и др.] // Сверхтвердые матер. – 2004. – № 5. – С. 3 – 19.* 3. *Ивженко В.В. Исследование процесса смешивания термопластичных масс на основе порошков тугоплавких соединений и парафина / В.В. Ивженко, В.А. Попов, Г.Ф. Сарнавская // Сверхтвердые матер. – 2008. – № 3. – С. 56 – 61.* 4. *Ивженко В.В. Исследование влияния параметров инжекционного литья термопластичных масс на основе порошков AlN, Si₃N₄, SiC, WC на процесс формования заготовок / В.В. Ивженко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2008. – Вып. 11. – С. 407 – 411.* 5. *Новиков Н.В. Оборудование для инжекционного литья термопластичных масс на основе керамических и металлокерамических порошков / [Н.В. Новиков, В.В. Ивженко, В.А. Попов и др.] // Порошковая металлургия. – 2004. – № 9 – 10. – С. 119 – 127.* 6. *Ивженко В.В. Исследование влияния параметров инжекционного литья на физико-механические свойства керамики на основе нитрида алюминия / [В.В. Ивженко, И.П. Фесенко, Н.В. Новиков и др.] // Сверхтвердые материалы. – 2008 – № 4. – С. 53 – 60.*

Поступила в редколлегию 21.08.12

Исследование процесса инъекционного литья изделий из термопластичных масс на основе порошков нитридов кремния и алюминия / В.В. ИВЖЕНКО, В.А. ПОПОВ, Г.Ф. САРНАВСКАЯ, Л.Д. ЧУЙКО // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 67 – 73. – Библиогр.: 6 назв.

Наведені результати технологічного дослідження впливу складу термопластичних мас на основі порошків нітриду алюмінію, нітриду кремнію і парафіну, параметрів інжекційного лиття на вихід придатних заготовок виробів.

The results of the technological study of the effect of thermoplastic mass composition on the basis of aluminum nitride, silicon nitride powders and paraffin, the parameters of injection molding, on the yield of good products have been reported.

Д.О. КАПУСТІН, асп., СНУ ім. В.Даля, Луганськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ КОНЦЕНТРОВАНИХ ЗАЛИШКІВ ВІД СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПАЛИВ

В статті викладаються матеріали експериментальних досліджень по визначенню втрат тиску та ефективних коефіцієнтів лінійних втрат на тертя і місцеві опори при транспортуванні концентрованих золових відходів, які проявляють властивості неньютонівської рідини, в сталому режимі по трубопроводу постійного діаметру, що має прямолінійну ділянку та повороти на 90° і 180°.

Постановка проблеми. В умовах світової економічної нестабільності та подорожчання основних енергоносіїв актуальним є впровадження енергосберегаючих технологій та підвищення енергоефективності використовуваних систем і комплексів.

На Україні близько 30 % електричної енергії виробляють ТЕС, де видалення твердих залишків організовано системами гідрозоловидалення (ГЗВ). Одним з основних недоліків таких систем є низька ефективність гідротранспорту за рахунок великої кількості рідини на одиницю транспортованого матеріалу (до 50 – 80 м³ води на тону твердого матеріалу). Витрати на утриман-

© Д.О. Капустін, 2012

ня гідрозоловидалення складають близько 7,8 – 11,2 млн. грн на рік і більше в залежності від потужності ТЕС [8].

Одним з основних напрямків підвищення ефективності ГЗВ є збільшення вмісту транспортованого матеріалу, що в умовах значної кількості тонкодисперсних фракцій призводить до структуроутворення. І золові (золошлакові) гідросуміші набувають властивостей неньютонівських рідин [4, 9].

Змінення основних показників гідротранспорту відбувається не рівномірно в залежності від концентрації транспортованого матеріалу, що необхідно враховувати при експлуатації таких систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

На території України та країн СНД дослідження по підвищенню концентрації твердого компонента при транспортуванні золошлакових відходів проводили ВНДГідровугілля та ВНДГідротехніки. Однак вплив твердого матеріалу на реологічні властивості не враховувався [3, 5].

Мета і завдання статті. Експериментальне визначення втрат напору, коефіцієнтів втрат на тертя і місцеві опори при течії концентрованої золової гідросуміші з властивостями неньютонівської рідини.

Матеріали та результати досліджень. Експериментальне визначення втрат тиску проходило на підставі показань пьезометрів при різних швидкостях транспортування [7]. За результатами випробувань було побудовано залежності втрат на тертя та місцеві опори від ефективного числа Рейнольдса для прямої ділянки, поворотів на 90° (рис. 1) та 180° при концентраціях твердого матеріалу 40, 50, 60 %.

Аналіз отриманих даних показав, що збільшення опору руху для прямолінійної ділянки та горизонтального повороту на 180° відбувається на всій досліджуваній ділянці і має близький до лінійного характер.

Однак найбільший інтерес представляють експериментальні залежності опору на вертикальному коліні 90°, які характеризуються збільшенням втрат напору при зменшенні середньої швидкості транспортування від 0,8 до 0,5 м/с (відповідно $Re_{e40} = 12000 - 26000$, $Re_{e50} = 600 - 1400$, $Re_{e60} = 90 - 200$).

За результатами проведених досліджень щодо визначення втрат на гідравлічне тертя у вказаних фасонних ділянках був зроблений розрахунок коефіцієнта лінійних втрат λ_e для концентрованої золової гідросуміші:

$$\lambda_e = \frac{2D \cdot \Delta p}{\rho_{сум} \cdot L \cdot u^2}. \quad (1)$$

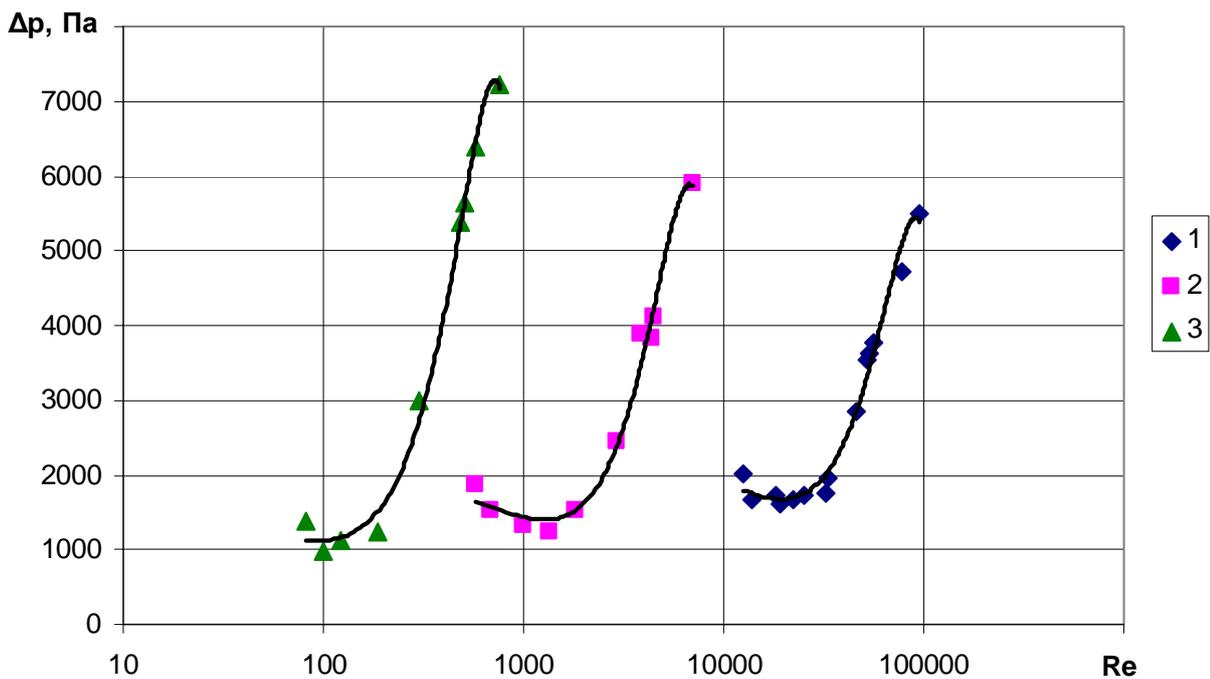


Рис. 1 – Залежність опору повороту трубопроводу на 90° від ефективного числа Рейнольдса: 1, 2, 3 відповідно для концентрацій 40, 50, 60 %.

Було встановлено, що відбувається зменшення ефективного коефіцієнта лінійних витрат на тертя λ_e з ростом ефективного числа Рейнольдса (рис. 2).

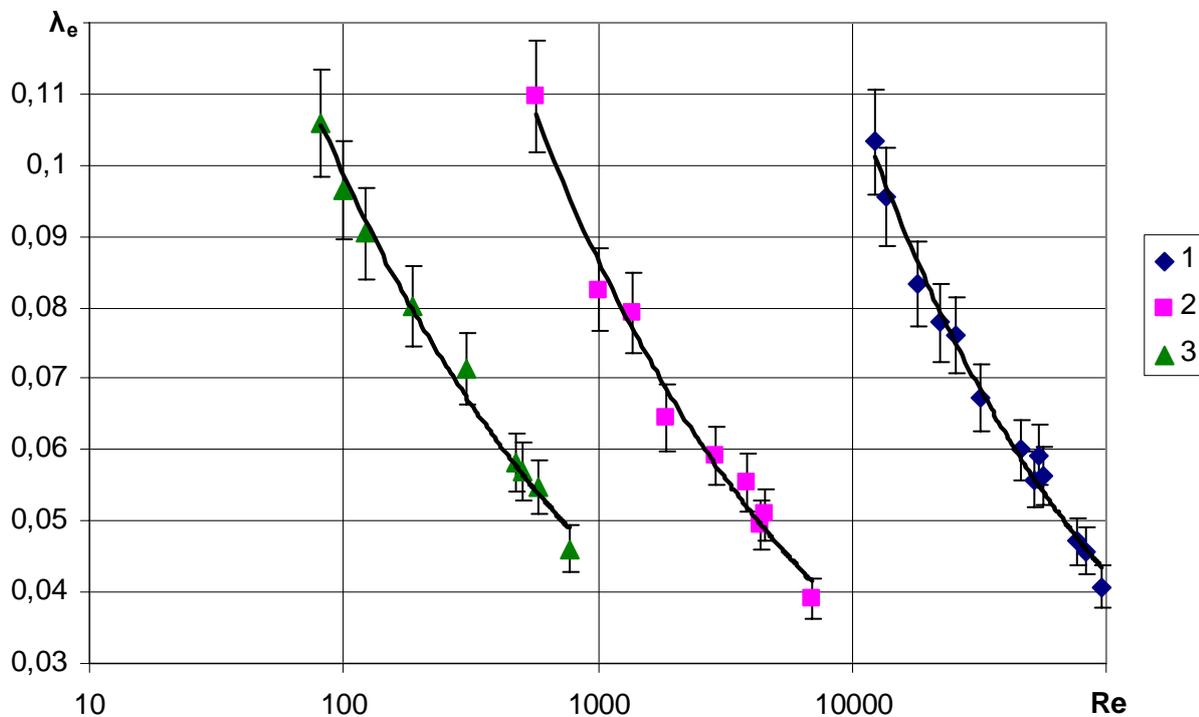


Рис. 2 – Залежність ефективного коефіцієнта лінійних витрат на тертя від ефективного числа Рейнольдса: 1, 2, 3 відповідно для концентрації 40, 50, 60 %.

Однак таке зменшення не є лінійним і з довірчою ймовірністю 95 % (довірчій інтервал складає не більше 0,0073) відповідає апроксимаційним залежностями виду:

$$\lambda_e = (a + b / \ln \text{Re}_e)^2, \quad (2)$$

де $a = 0,0123C - 0,7124$ і $b = -0,1429C + 9,897$ – коефіцієнти, залежні від масової концентрації твердого матеріалу в гідросуміші.

Разом з коефіцієнтом λ_e для лінійної ділянки трубопроводу були визначені ефективні коефіцієнти місцевих опорів ζ_e при течії гідросуміші в фасонних частинах.

Залежності для визначення ζ_e від ефективного числа Рейнольдса для вертикального повороту 90° мають подібний з горизонтальним поворотом на 180° характер і описуються схожими за формою математичними виразами, що свідчить про подобу процесів, які відбуваються в них (рис. 3).

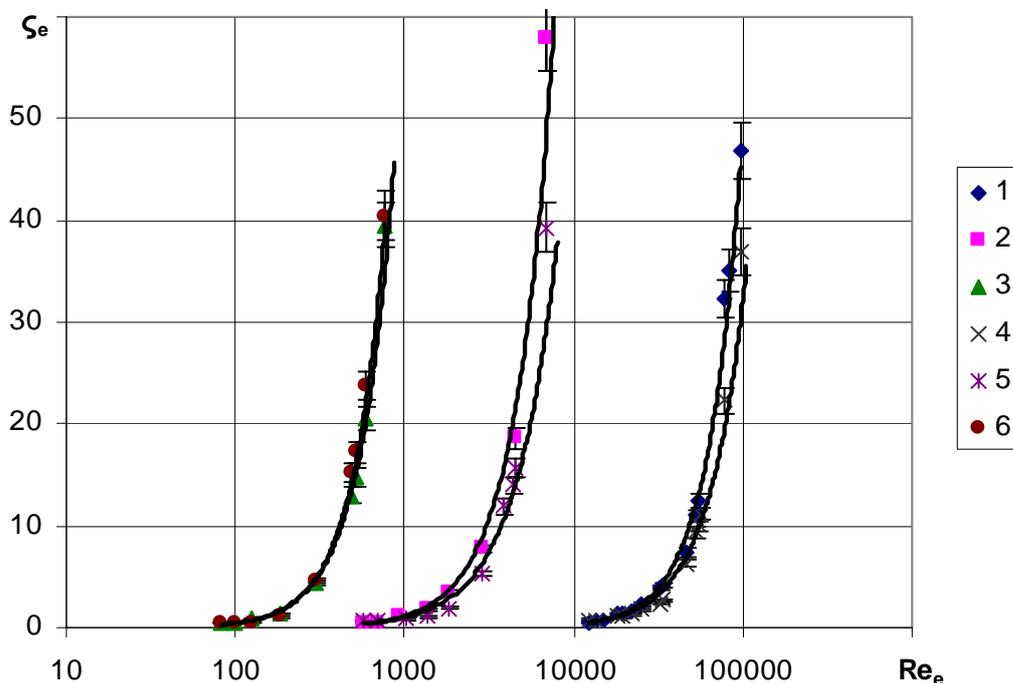


Рис. 3 – Залежність ефективного коефіцієнта місцевих опорів для поворотів трубопроводу на 180° та 90° від ефективного числа Рейнольдса: 1, 2, 3 та 4, 5, 6 відповідно для концентрації 40, 50, 60 %.

Отримані в ході експерименту дані з довірчою ймовірністю 95 % (довірчій інтервал складає на більше 0,057) апроксимуються ступеневими залежнос-

тями виду:

$$\zeta_e = m \cdot \text{Re}_e^n, \quad (3)$$

де $m = e^{-7,57-4,44C^3}$; $n = \frac{(C-48,5)^2}{320} + 1,89$ – коефіцієнти, що залежать від масової концентрації транспортованого матеріалу, для горизонтального повороту; $m = 2,99 \cdot 10^{-5} - 4,96 \cdot 10^{-7} C$, $n = \frac{(C-51)^2}{245} + 1,74$ – для вертикального повороту.

Зміни ефективних коефіцієнтів місцевих опорів мають яскраво виражений ступеневий характер і різко збільшується при масових концентраціях понад 50 %.

Висновки. За результатами експериментальних досліджень було встановлено, що залежності зміни втрат напору від ефективного числа Рейнольдса для прямолінійної ділянки та повороту на 180° мають близький до лінійного характер в наслідок локальним руйнуванням структури з ростом швидкості транспортування. Зміни втрат напору від ефективного числа Рейнольдса для вертикального коліна на 90° мають екстремуми в діапазоні швидкостей 0,5 – 0,8 м/с ($\text{Re}_{e40} = 12000 - 26000$, $\text{Re}_{e50} = 600 - 1400$, $\text{Re}_{e60} = 90 - 200$), що зумовлюються утворенням нерухомого шару на дні трубопроводу. Ефективний коефіцієнт втрат на тертя в залежності від ефективного числа Рейнольдса нелінійно знижується на всьому діапазоні вимірювань при всіх концентраціях твердого компоненту, а ефективні коефіцієнти місцевих опорів для поворотів на 90° та 180° в тих же умовах зростають за ступеневим законом, що свідчить про сталість режиму течії.

Список літератури: 1. Джваршешивили А.Г. Системы трубопроводного транспорта горно-обогатительных предприятий / А.Г. Джваршешивили. – М.: Недра, 1981. – 384 с. 2. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности / В.Н. Покровская. – М.: Недра, 1985. – 192 с. 3. Добкин Э.Л. Приготовление и транспортирование зольной пульпы высокой концентрации / Э.Л. Добкин, И.А. Потапов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 1985. – С. 26 – 32. 4. Капустін Д.О. Реологічні дослідження концентрованих золоних гідросумішей / Д.О. Капустін // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012. – № 3 (174). – С. 73 – 79. 5. Світлий Ю.Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю.Г. Світлий,

О.А. Круть. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с. **6.** *Смолдырев А.Е.* Гидро- и пневмотранспорт / *А.Е. Смолдырев.* – М.: Металлургия, 1975. – 384 с. **7.** *Чернецка-Білецька Н.Б.* Стенд для досліджень характеристик руху концентрованих відходів паливної енергетики / [*Н.Б. Чернецка-Білецька, О.В. Куценко, Є.О. Варакута та ін.*] // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – 2011. – № 1 (155), Ч. 2. – С. 252 – 256. **8.** *Путилов В.Я.* Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками угольных тепловых электростанций на примере Каширской ГРЭС [Электронный ресурс] / [*В.Я. Путилов, А.М. Луньков, Р.М. Фаткуллин та ін.*]. – 2009. – С. 11. – Режим доступу до журн.: <http://срр.e-apbe.ru/uploads/files/putilov-izderzhki.pdf>. **9.** *Урьев Н.Б.* Высококонцентрированные дисперсные системы / *Н.Б. Урьев.* – М.: Химия, 1980. – 320 с.

Надійшла до редколегії 25.07.12

УДК 621.182.95

Дослідження параметрів гідротранспортування концентрованих залишків від спалювання твердих палив / Д.О. КАПУСТИН // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 73 – 78. – Бібліогр.: 9 назв.

В статье представлены материалы экспериментальных исследований по определению потерь давления и эффективных коэффициентов линейных потерь на трение и местные сопротивления при транспортировании концентрированных золовых отходов, которые проявляют свойства неньютоновской жидкости, в установившемся режиме по трубопроводу постоянного диаметра, который имеет прямолинейный участок и повороты на 90° и 180°.

The paper presents data of experimental studies to determine the head loss and the effective coefficients of linear friction and local resistance during transportation of ash concentrated wastes that exhibit properties non - newtonian fluid in the steady state of constant diameter pipeline, which has a straight portion and turns on the 90° and 180°.

С. КОВАЛЬ, д-р техн. наук, проф.,

Варминско-Мазурский Университет, Ольштын, Польша

В.А. САПОЖНИКОВ, инж., ОГАСА, Одесса

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА ОДНОРОДНОСТЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В ЭЛЕМЕНТЕ

В статье показаны особенности и приведены результаты моделирования воздействия факторов состава на параметры неоднородности прочности бетона в вертикально формируемых элементах.

При проведении мониторинга объектов монолитного домостроения отмеченные различия в скорости ультразвука по высоте колонн и стен, отформованных из высокоподвижных смесей, указали на необходимость повышения однородности бетона в конструкциях. Ухудшение неоднородности бетона способно снизить надежность монолитно-каркасных и других зданий в условиях сейсмических и эксплуатационных воздействий [1].

К основным причинам, влияющим на однородность бетона можно отнести низкое значение предельного напряжения сдвига бетонных смесей, гравитационные силы, влияющие на миграцию заполнителя, агрегатирование частиц цемента и наполнителя, насыщенность арматурой и сложная конфигурация конструкций, а также динамические процессы при укладке и перемещении бетонных смесей (в том числе гидротранспортом) [1].

Целью исследования является оценка влияния факторов состава на параметры неоднородности пространственного поля прочности бетона.

Решение задачи повышения однородности бетона показано при исследовании влияния добавок на критерии $G\{h\}$ неоднородности пространственного поля композитов [2 – 3].

В эксперименте с бетоном из равноподвижных смесей (осадка стандартного конуса $OK = 18 \pm 2$ см) по плану B_3 изменялось содержание поликарбоксилатного суперпластификатора ПК Супер в пределах от 0 до 0,6 % от массы цемента (фактор X_1), наполнителя – молотого известняка в диапазоне от 0 до 30 % (фактор X_2), вводимого для повышения связности бетонной смеси, и портландцемента ПЦ II/A III в диапазоне от 340 до 480 кг/м³ (X_3).

Из высокоподвижных бетонных смесей отформованы в вертикальном

положении столбчатые элементы (высотой 100 см и диаметром 10 см), которые после затвердевания разделялись на фрагменты.

Анализ рис. 1 а показывает, что в зависимости от состава прочность бетона в элементе распределяется неравномерно, причем с увеличением количества цемента и введения дисперсного наполнителя прочность не только возрастает, но становится более равномерной.

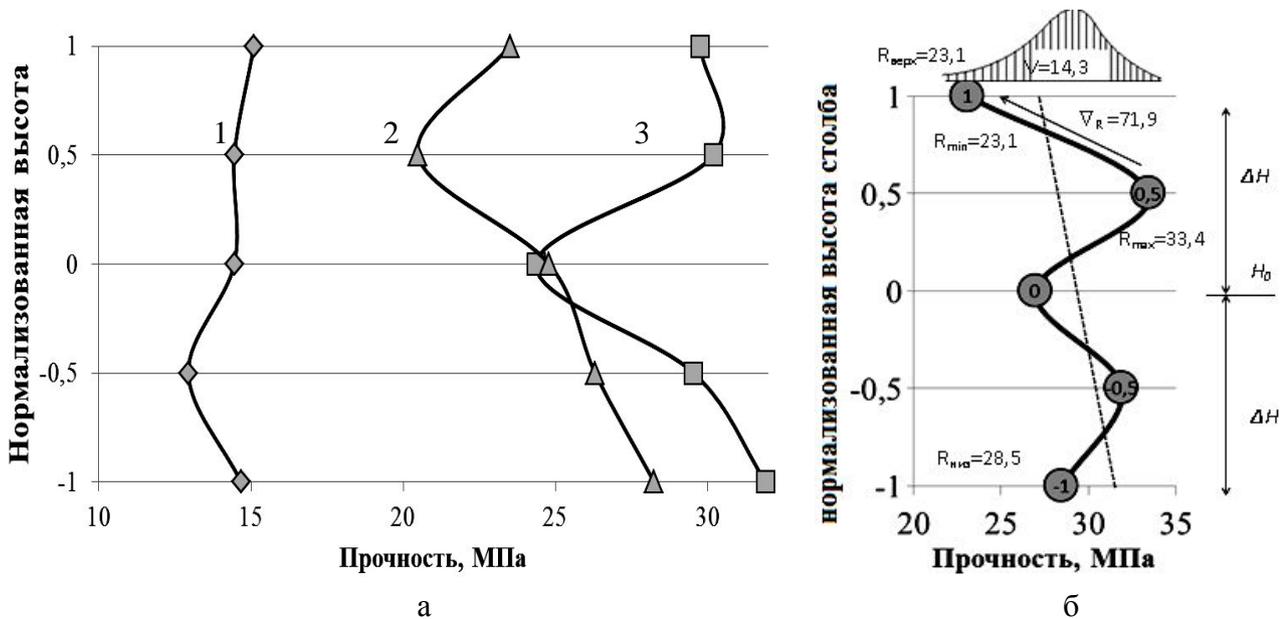


Рис. 1 – Распределение прочности (а) при изменении состава (1 – Ц = 340 кг/м³; 2 – Ц = 480 кг/м³; 3 – Н = 15 %, Ц = 410 кг/м³) и параметры линейного поля неоднородности (б)

На рис. 1.б представлено распределение прочности $R_{\text{сж}}$ бетона по высоте (H) вертикально отформованного столбчатого элемента, определенной при испытании фрагментов-цилиндров. Прочность бетона состава (СП = 0,3 %; Н = 15 %, Ц = 340 кг/м³) по высоте столбчатого элемента распределена неравномерно. Неравномерному распределению прочности на отдельных участках способствуют и пристеночные эффекты, а также то, что часть свободной воды скапливается под нижними поверхностями зерен заполнителя, образуя разупрочняющие полости.

Зависимость $R = f(H)$ описывается эпюрой

$$R = - 2,0037h^4 + 24,746h^3 - 106,79h^2 + 187,56h - 80,43. \quad (1)$$

На основании анализа эпюры (для состава № 7) построены критерии оценки неоднородности, которые условно (с точностью до ошибки аппрок-

симации) можно назвать детерминированными:

а) средняя прочность, рассчитанная по $n = 5$ сечениям столба:

$$R_{cp} = \Sigma R/n = 144/5 = 28,8 \text{ МПа}; \quad (2)$$

б) экстремальные показатели: $R_{max} = 23,1$ МПа – максимальная прочность (четвертый фрагмент, $n = 4$) и $R_{min} = 33,4$ МПа – минимальная прочность (верхний фрагмент, $n = 6$);

в) перепад прочности по высоте столба:

$$\kappa = R_{min}/R_{max} = 33,4/23,1 = 1,4; \quad (3)$$

г) традиционный коэффициент расслоения как отношение средних прочностей верхнего и нижнего фрагментов:

$$K_p = R_{верх}/R_{низ} = 23,1/28,5 = 0,8; \quad (4)$$

д) относительный градиент – различие максимальной и минимальной прочности на расстоянии Δh между сечениями, в которых отмечены экстремальные значения R_{max} и R_{min} , отнесенное к среднему значению R_{cp} по высоте столба:

$$\nabla_R = ((R_{max} - R_{min})/\Delta h)/R_{cp} = ((33,4-23,1)/0,5)/28,8 \cdot 100 = 71,9 \%. \quad (5)$$

В качестве меры разброса случайных оценок по высоте H столба относительно R_{cp} использовалась вероятностная характеристика – среднеквадратичное отклонение s_R (МПа) с числом степеней свободы $f_R = 6 - 1 = 5$, а также коэффициент вариации:

$$V\{R\} = s_R/R_{cp} = (4,1/28,8) \cdot 100 = 14,3 \%. \quad (6)$$

В данном случае прочность верхнего слоя значительно меньше, чем у подошвы столба. Так как гидростатическое давление по высоте формы распределяется неравномерно (максимум на дне формы, минимум на наружной поверхности), то с приближением к нижним слоям вытесняется все больше жидкой фазы.

Задача повышения однородности заключалась в минимизации рассматриваемых критериев при управлении параметрами состава бетона.

По результатам эксперимента построены экспериментально – статистические зависимости, которые дополнены эффектом тройного взаимодействия b_{123} с целью улучшения точности описания связей между показателями и рецептурно-технологическими факторами.

Для средней прочности получена (при уровне риска $\alpha = 0,2$ и ошибке эксперимента $s_3 = 1,7$ МПа) зависимость:

$$R_{cp} = 31,7 - 1,3x_1 - 8,0x_1^2 + 2,2x_2 - 1,6x_2^2 + 4,1x_3 + 1,3x_1x_2x_3 \quad (7)$$

с точками максимума $R_{max} = 36,6$ МПа ($x_1 = -0,024$; $x_2 = 0,698$; $x_3 = 1$) и минимума $R_{min} = 15,8$ МПа ($x_1 = 1$; $x_2 = -1$; $x_3 = -1$).

Аналогичная по виду зависимость получена для коэффициента вариации, показывающего разброс оценок относительно среднего:

$$v_R = 21,9 + 4,5x_1 + 1,4x_2 + 1,6x_3 - 8,9x_1^2 + 9,7x_2^2 - 8,2x_3^2 + 3,0x_1x_3 + 1,7x_1x_2x_3 \quad (8)$$

с точками максимума $v_{Rmax} = 30,8$ МПа ($x_1 = 0,264$; $x_2 = -1$; $x_3 = 0,117$) и минимума $v_{Rmin} = 1,2$ МПа ($x_1 = -1$; $x_2 = 0,013$; $x_3 = 1$).

Сравнение точек минимуму и максимума показывает различие в их координатах. Таким образом, рецептурные решения, направленные повышение прочности могут не соответствовать решениям, направленным на повышение однородности прочности.

На рис. 2. а-г представлены в графическом виде зависимости влияния факторов состава на исследуемые показатели однородности прочности бетона в столбчатом элементе.

Рост прочности бетона в столбе (рис. 2 а) связан, в первую очередь, с повышением количества цемента. Дозировка суперпластификатора также повышает прочность, но до некоторых пределов, зависящих от содержания наполнителя и цемента. Понижение прочности до минимума $R_{min} = 15,8$ МПа вероятно связано с замедляющим влиянием химической добавки при ее повышенных концентрациях и малом количестве цемента.

Эти различия связаны с неоднородностью структуры бетона в элементе в результате сегрегации компонентов.

Следовательно, рецептурные решения, направленные на повышение

прочности бетона в образцах, не сопровождаются адекватным повышением прочности бетона в конструкционном элементе.

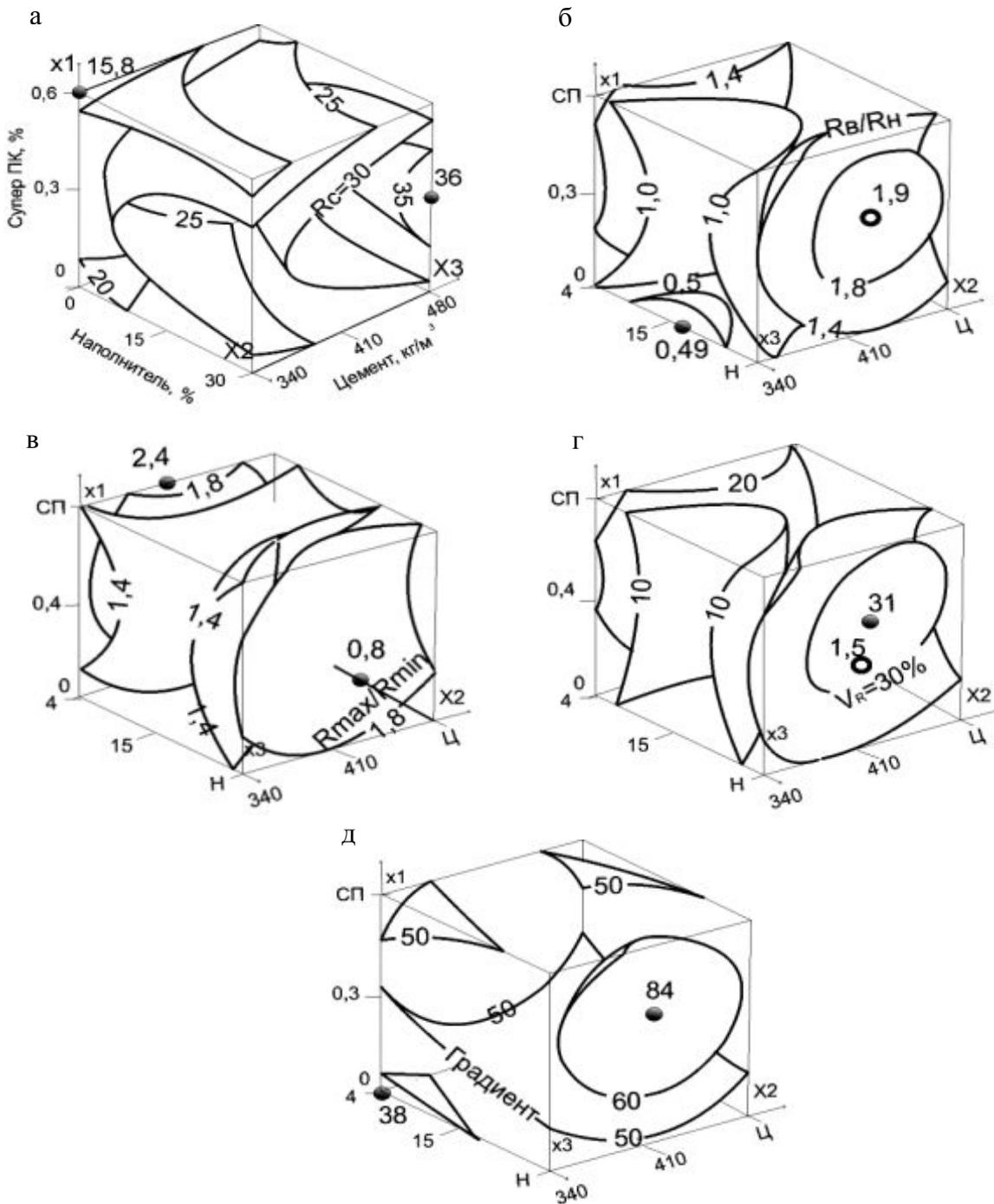


Рис. 2 – Влияние факторов состава бетона на среднюю прочность в столбе (а), отношение прочности верхнего и нижнего фрагментов (б), максимальной и минимальной прочности (в), а также градиент прочности (г) и коэффициент вариации (д).

Рост показателя $R_{верх}/R_{низ}$ (рис. 2. б), достигаемый с увеличением количества наполнителя и суперпластификатора, говорит о том, что в этом случае

более прочными оказываются элементы верхней части столба. Выравнивание прочности достигается при приближении показателя $R_{\text{верх}}/R_{\text{низ}}$ к единице. Это возможно в случае дозировки суперпластификатора и наполнителя на среднем уровне (в центральной части куба).

Диаграмма модели относительного перепада - отношения максимальной R_{max} и минимальной R_{min} прочности (рис. 2. в), определяет однородную зону в отсутствие СП при среднем содержании наполнителя и цемента. И, наоборот, различие возрастает более чем в 2 раза, если уменьшать содержание цемента и увеличивать количество суперпластификатора.

Градиент прочности по высоте может возрастать с ростом содержания наполнителя. Судя по рис. 2. г, наиболее безопасным будет пространственное поля элемента в случае минимального содержания цемента и наполнителя при понижении количества суперпластификатора.

Близкие по смыслу выводы относительно ухудшения однородности следуют из анализа модели коэффициента вариации. В то же время минимальное значения $v_{R_{\text{min}}} = 1,2\%$ относится не высоким, а к средним дозировкам дисперсного наполнителя.

Следует отметить, что точность рассмотренных моделей, судя по ошибке эксперимента s_3 , отнюдь не равноценна. Поэтому значения минимума и максимума использованы не только при материаловедческом анализе ЭС-моделей, но и при дискриминации обобщающих показателей неоднородности по критерию полноты [2]:

$$t_{\text{min}}^{\text{max}} = (G_{\text{max}} - G_{\text{min}})/s_3\{G\}. \quad (8)$$

Чем мера полноты в факторном пространстве выше, тем эффективнее критерий неоднородности поля (если его значение менее 6, то обобщающий показатель классифицировался как непригодный для анализа).

Точность полученных моделей неравноценна, о чем свидетельствует ошибка эксперимента s_3 и показатель полноты $t_{\text{min}}^{\text{max}}$ (таблица).

Судя по показателю полноты $t_{\text{min}}^{\text{max}}$, наиболее эффективны зависимости коэффициента расслоения $K_R = R_g/R_n$, перепада прочности $\Delta_R = R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$.

Регулирование параметрами состава позволяет улучшить удобоукладываемость бетонных смесей и повысить однородность прочности затвердевшего бетона в пространстве изделия или элемента.

Показатели поля определяют эффективность наполнителя в бетоне, при

его оптимальной дозировке, и ограничивают количество поликарбокилатного суперпластификатора в результате снижения однородности бетонной смеси.

Таблица

Характеристики поля неоднородности прочности

Критерий однородности	t_{\min}^{\max}	s_3	G_{\max}	Компоненты			G_{\min}	Компоненты		
				СП	H	Ц		СП	H	Ц
R_{cp}	12,2	1,7	36,6	0,30	24	480	15,8	0,6	0	340
$K_R = R_6/R_H$	21,1	0,07	1,98	0,45	30	445	0,50	0	15	300
$\Delta_R = R_{\max}/R_{\min}$	10,3	0,16	2,40	0,43	30	420	0,75	0	30	480
$\nabla_R = (R_{\max} - R_{\min})/h$	4,1	18,1	84,2	0,46	30	410	10,5	0	0	340
$V_R = s_R/R_{\text{cp}}$	9,5	3,10	30,9	0,25	30	420	1,35	0	16	480

Список литературы: 1. Евдокимов Н.И. Технология монолитного бетона и железобетона / Н.И. Евдокимов, А.Ф. Мацкевич. – М.: Высш. школа, 1980. – 325 с. 2. Вознесенский В.А. Сравнительный анализ критериев неоднородности пространственно-геометрических полей свойств композитов в тонкостенных конструкциях / [В.А. Вознесенский, С.В. Коваль, Т.В. Ляшенко и др.] // Ресурсосберегающие решения в технологии строительных материалов и конструкций. – 1992. – С. 3 – 12. 3. Voznesensky V. The Application of Experimental Statistical Models to Multicriterion Design of Claidite Concrete / [V. Voznesensky, S. Koval, T. Liashenko at al.] // Structural Lighveight Aggregate Concrete: Int. Symp.: proc. – Oslo, 1995. – P. 260 – 272.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 691.175:519

Влияние состава на однородность прочности бетона в элементе / С. КОВАЛЬ, В.А. САПОЖНИКОВ // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 79 – 85. – Библиогр.: 3 назв.

У статті показано особливості і приведено результати моделювання дії факторів складу на параметри неоднорідності міцності бетону у вертикально формованих елементах.

The article describes characteristics and results of modeling the impact of composite factors on the parameters of heterogeneity of concrete strength in vertical molded elements.

О.С. МИХАЙЛЮТА, канд. техн. наук, наук. співр.,
ДВНЗ «УДХТУ», Дніпропетровськ,

В.В. КОЛЕДА, канд. техн. наук, пров. наук. співр.,
ДВНЗ «УДХТУ», Дніпропетровськ,

Є.В. АЛЕКСЕЄВ, асп., ДВНЗ «УДХТУ», Дніпропетровськ,

В.В. СЕМ'ЯНИСТА, студ., ДВНЗ «УДХТУ», Дніпропетровськ

КЕРАМІЧНІ МАСИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЛІНКЕРНОЇ ТРОТУАРНОЇ ПЛИТКИ

Встановлена можливість одержання клінкерної кераміки за енерго- та ресурсозберігаючими технологіями. З використанням гранітного пилу та глинистої сировини розроблено керамічні маси, які призначені для формування високоміцних керамічних виробів методом напівсухого пресування. Отримана після випалу при 1170 °С дослідна кераміка має наступні характеристики: повна усадка до 11,5 %, водопоглинання – 2 – 3 %, механічна міцність на стискання – до 250 МПа, зносостійкість 13 – 17 см³/50 см².

Вступ та постановка задачі досліджень. Сьогодні в будівництві все більшого попиту набувають керамічні клінкерні тротуарні плитки (бруківка), витісняючи із споживчого ринку аналогічні вироби на цементному зв'язуючому.

Клінкерна бруківка – це штучний кам'яний матеріал різноманітної форми, вироблений з глинистого композиту, що включає спікаючі та модифікуючі добавки, шляхом випалу при температурі до 1300 °С до повного спікання без заскловування поверхні [1, 2]. Від традиційних виробів грубої будівельної кераміки (цегли звичайної, черепиці, облицювальних плиток), клінкерні керамічні матеріали відрізняються більш високою механічною міцністю на стискання – 100 МПа і вище, опором на стирання – до 20 см³/50 см² і меншим водопоглинанням (0 – 6 мас. %) [3, 4]. Такі високі показники забезпечені їх щільною, мікрозернистою структурою, без крупних включень, пустот і каверн.

Маючи ряд вагомих переваг у порівнянні з бетонною плиткою, таких як широка кольорова гама, довговічність, механічні властивості та ін., керамічна бруківка відрізняється високою ціною, яка в значній мірі обумовлена технологією виготовлення – це і більш ретельна переробка сировинних матеріалів,

© О.С. Михайлюта, В.В. Коледа, Є.В. Алексеев, В.В. Сем'яніста, 2012

і наявність обов'язкового високотемпературного випалу (до 1300 °С). Крім цього, вартість такої плитки також залежить від значних транспортних витрат, оскільки майже вся така продукція представлена іноземними виробниками CRH KLINKIER Clay Solutions (Польща – Голандія); CRH АКА, ABC-Klinkergruppe, Roben, Kerawill (Німеччина) та ін.

На Україні єдине підприємство, яке має технологію виготовлення дорожньої бруківки у відповідності до технічних умов ТУ У В.2.7-26.4-34327895-001:2008 «Керамический клинкер для облицовки фасадов «Клинкер-керам» и мощения дорог «Бруккерам» – ТОВ «Керамейя» (м. Суми).

Проте на території нашої країни є велика кількість родовищ глинистих матеріалів, гранітів та пегматитів та ін. сировини, а також потужні ресурси для виготовлення таких виробів. Але, враховуючи дані, що були одержані при обробці наукової літератури, стало очевидним, що розробкою вказаних керамічних мас вітчизняні науковці не займалися останні 25 – 30 років.

Таким чином, актуальними та перспективними є дослідження та підбір складів керамічних мас для виготовлення керамічної клинкерної бруківки, а також вдосконалення технології її виготовлення з метою енерго- та ресурсозбереження, що і стало метою даної роботи.

Дослідження сировинних матеріалів. При аналізі придатності тієї чи іншої сировини в керамічній технології важливим є визначення хіміко-мінералогічного складу, що дозволяє правильно підбирати дослідні склади керамічних мас, методи формовки, режими термічної обробки та ін.

Хімічний склад гранітного пилу, наступний, мас. %: SiO_2 – 72,0; Al_2O_3 – 11,2; CaO – 6,1; K_2O – 4,4; Na_2O – 3,05; в.п.п. – 3,25.

За приведеними результатами можна зробити висновок про досить високий вміст в гранітному пилі оксидів лужних металів K_2O та Na_2O – до 7,45 %. Зазначене свідчить про можливість інтенсивного спікання даного матеріалу при температурах 1100 – 1180 °С [5], оскільки наявність оксидів лужних металів вказує на присутність польвошпатових мінералів – альбіту ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ з температурою початку плавлення 1118 °С) та мікрокліну ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ з температурою початку плавлення 1170 °С [6]).

Дослідження якісного мінералогічного складу рентгенофазовим аналізом підтвердили наявність зазначених мінералів (рис. 1). На рентгенограмі присутні дифракційні максимуми, характерні мікрокліну ($d = 4,18; 3,22; 2,16; 1,99; 1,80; 1,459 \text{ \AA}$) та альбіту ($d = 4,016; 3,767; 3,66; 3,206; 3,179; 2,952 \text{ \AA}$), при чому інтенсивність піків мікрокліну більша, ніж альбіту, що співпадає з

даними хімічного аналізу. Окрім того, ідентифікується також кварц β -SiO₂ (d = 4,25; 3,33; 2,43; 2,26; 1,54; 1,37 Å), а також – в меншій кількості анортит CaO·Al₂O₃·6SiO₂ (d = 4,033; 3,611; 3,249; 3,197; 1,164; 2,519 Å) та кальцит CaCO₃ (d = 3,03; 2,28; 2,09; 1,91; 1,873; 1,600 Å).

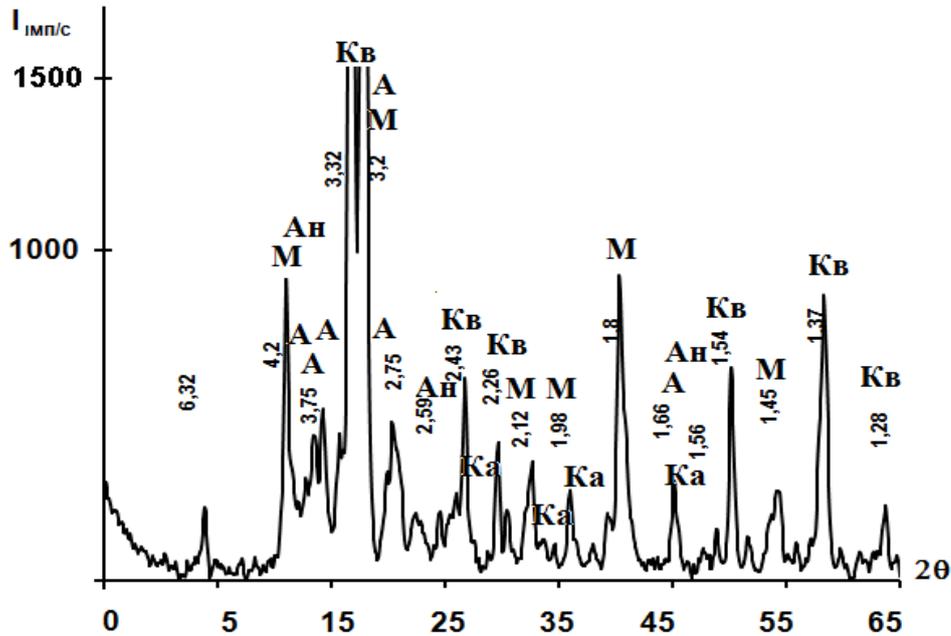


Рис. 1. Рентгенограма гранітного пилу: М – мікроклін, А – альбіт, Ан – анортит, Ка – кальцит, Кв – кварц.

Враховуючи встановлений хіміко-мінералогічний склад гранітного пилу, було зроблено висновок, що при спіканні в керамічній масі він буде виступати в ролі плавня.

Для розробки керамічних мас було обрано глинисті матеріали, що мають досить високі пластичні властивості: глину ПЛГ-2 та бентоніт ГФБП Пологівського родовища та каолін МК-0 Мурзинського родовища, хімічний склад яких приведений в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад глинистих матеріалів, мас. %

Сировинний матеріал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	в.п.п.
Каолін МК-0	48,8	38,1	0,9	0,29	0,34	0,17	0,1	0,1	11,2
Глина ПЛГ-2	52,5	33,6	1,6	0,66	0,35	0,59	0,7	0,4	9,6
Бентоніт ГФБП	60,1	16,3	4,2	1,3	1,2	1,5	2,1	1,5	11,8

З приведеної таблиці видно, що найбільш високий вміст Al₂O₃ (38,1 %) характерний для каоліну мурзинського, при цьому вміст забарвлюючих оксидів Fe₂O₃ та TiO₂ не значний (відповідно 0,9 та 0,29 %), що свідчить про

високу вогнетривкість даної сировини, отже, окрім пластичних властивостей, даний глинистий матеріал може забезпечити керамічній масі підвищену стійкість до деформації в процесі випалу.

Глина пологівська відрізняється більш низьким вмістом оксиду алюмінію (33,6 %), та більш високим вмістом Fe_2O_3 (1,6 %), що, завдяки флюсуючій дії останнього, буде сприяти зниженню температури випалу керамічних мас. Особливо це буде характерно при введенні бентоніту Пологівського, який окрім підвищеного вмісту Fe_2O_3 (4,2 %), містить ще й підвищену кількість оксидів лужних металів (Na_2O – 2,1 %; K_2O – 1,5 %).

Аналіз пластичних властивостей показав, що глинисті матеріали за ДСТУ [7] відносяться: глина та бентоніт пологівські – до середньопластичних ($\Pi = 15 - 25$), каолін мурзинський – до помірнопластичних ($\Pi = 7 - 15$) глинистих матеріалів, тому при введенні їх до складів керамічних мас вони будуть надавати масам добрі формовочні властивості.

Важливим показником глинистих матеріалів є їх поведінка при термічній обробці, яку в даній роботі досліджували за допомогою диференційно-термічного аналізу ДТА (рис. 2).

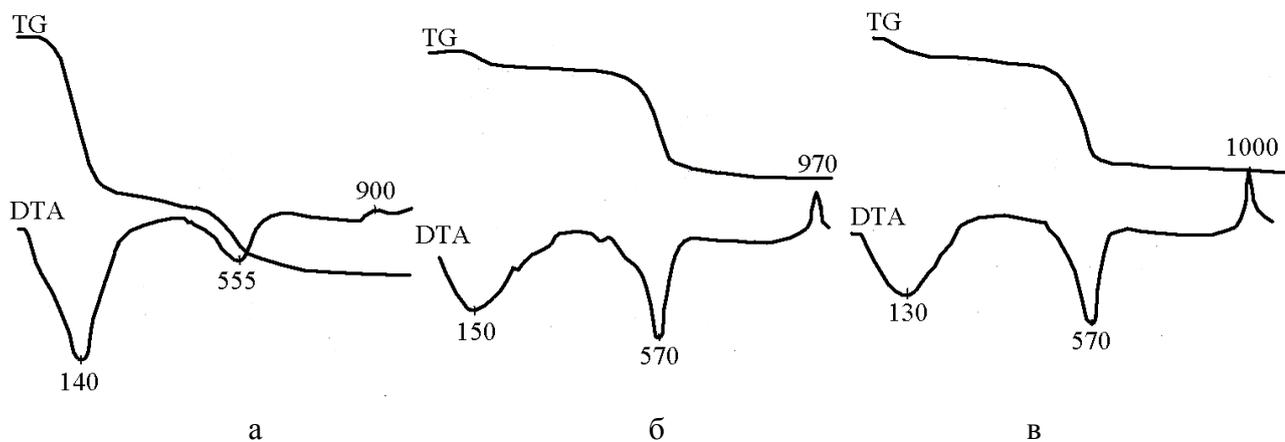


Рис. 2. Термограми дослідних глинистих матеріалів: а – пологівського бентоніту, б – пологівської глини, в – мурзинського каоліну.

На отриманих кривих ДТА присутні ендо- та екзоефекти, пов'язані з поглинанням та виділенням тепла при протіканні фізико-хімічних процесів в глинистій сировині, а на кривих TG спостерігаються перепади, що свідчать про втрати маси, які супроводжують зазначені процеси. Перший ендоэффект в інтервалі 100 – 250 °С, обумовлений втратою фізичнопов'язаної води із структури глинистих матеріалів, другий (при 500 – 600 °С) – відповідає видаленню хімічнопов'язаної води із структури глинистих матеріалів; екзотермічна

реакція в інтервалі 950 – 1050 °С [8] свідчить про кристалізацією аморфних продуктів розпаду глинистих матеріалів і утворення муліту.

Розрахункові втрати при прожарюванні дослідних глинистих матеріалів, отримані за допомогою кривих TG, приведені в табл. 2. Необхідно зазначити, що глинисті матеріали мають досить суттєві втрати маси при термічній обробці, що погоджуються з їх відносно високою пластичністю. Вказане дозволяє, з одного боку, прогнозувати можливість використання цих глинистих матеріалів в якості зв'язуючого компонента в складах керамічних мас, а з другого боку – оскільки глинисті матеріали будуть значно впливати на усадку виробів, їх кількість повинна бути невисокою.

Таблиця 2 – Розрахункові втрати маси глинистих матеріалів при нагріванні (за кривою TG)

Назва матеріалу	Температурний інтервал, °С	Втрати маси, %	Загальні втрати маси, %
Глина ПЛГ-2	100 – 200	1,3	9,6
	500 – 600	8,3	
Бентоніт ГФБП	100 – 200	8,3	11,8
	500 – 600	3,5	
Каолін МК-0	100 – 200	1,8	11,2
	500 – 600	9,4	

Планування експерименту та методики досліджень. Для виготовлення керамічної клінкерної бруківки зазвичай застосовують метод напівсухого пресування [9]. Такий метод дозволяє отримати чіткі рівні грані, точні розміри та форми виробів при щільній структурі матеріалу. Для такого методу формування виробів висока пластичність керамічної маси не є необхідною, тому в якості основного компонента до складів мас вводиться гранітний пил в кількості 95 – 85 мас. %, а глинисті матеріали з різною пластичністю та вогнетривкістю використовуються в якості зв'язуючого компонента і вводяться в кількості 5 – 15 мас. %.

Керамічні зразки формували напівсухим пресуванням при додаванні до мас води в кількості 10 %. Зразки висушували в природних умовах та випалювали при температурах 1140, 1160, 1180 °С.

Для випалених зразків вимірювали усадку, водопоглинання та механічну міцність за стандартними методиками [10]. Одержані результати досліджень обробляли за методикою повного факторного експерименту другого порядку [11]. Опір стиранню визначали за показником втрати маси кераміч-

ного зразка на абразивному колі з додаванням піску.

Обробка результатів експерименту. Результати визначення основних властивостей приведені на рис. 3 – 5.

При аналізі впливу вмісту каоліну та температури випалу (рис. 3) видно, що з підвищенням температури випалу відбувається збільшення повної усадки зразків від 7 до 12 %. Водопоглинання до температури 1160 °С знижується з 14 до 3 %, а в інтервалі 1160 – 1180 °С – до 1 %, при чому для зразків, випалених при 1180 °С, спостерігається незначне оскльовання поверхні, особливо для тих, що містять лише 5 мас. % каоліну.

Чим більше каоліну тим менше водопоглинання зразків – наприклад, при збільшенні вмісту каоліну від 5 до 15 % водопоглинання при температурі 1140 °С зменшується від 14 до 4 %. Останнє можна пояснити тим, що тонкодисперсні часточки каолініту заповнюють порожнечу між більш грубодисперсними часточками гранітного пилу, утворюючи більш щільну упаковку.

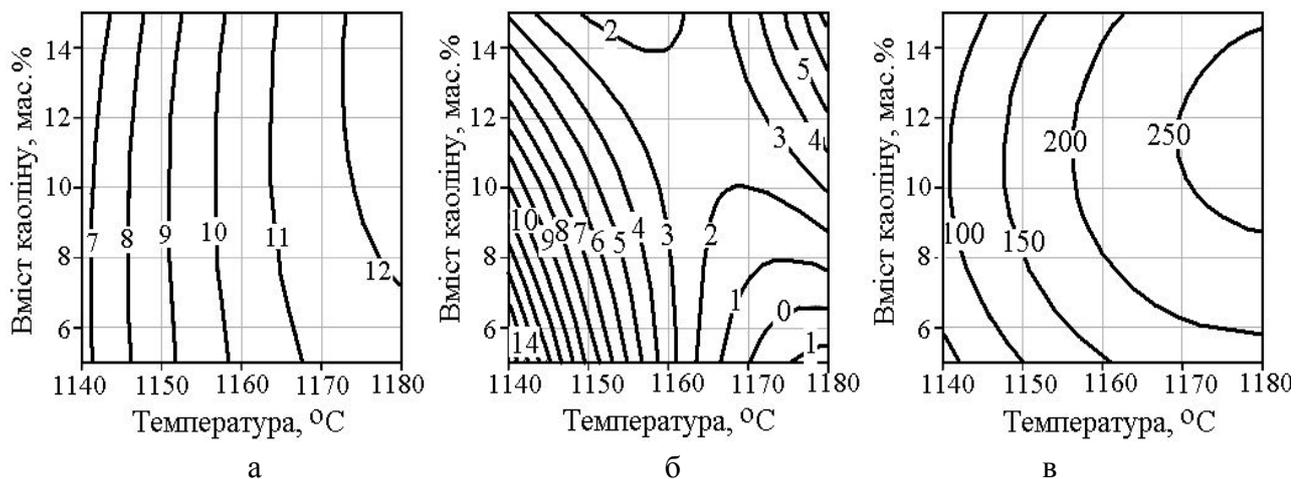


Рис. 3 – Вплив вмісту каоліну та температури випалу на: а – повну усадку (%), б – водопоглинання (%), в – міцність дослідних керамічних зразків (МПа).

Міцність з підвищенням температури випалу збільшується від 100 до 250 МПа за рахунок утворення більш щільної структури при плавлінні польовошпатових мінералів.

З рис. 4 видно, що при підвищенні температури і вмісту глини пологівської відбувається збільшення повної усадки від 7 до 15 %, але ці значення вищі, у порівнянні з аналогічними, коли до складу мас вводили каолін.

Зазначене можна пояснити більшою легкоплавкістю глини за рахунок низької кількості Al_2O_3 та підвищеного вмісту оксиду заліза.

Водопоглинання значно знижується до температури 1170 °С (з 15 до

3 %), а після 1170 °С – до 1 %. Зі збільшенням вмісту глини, водопоглинання зменшується. Також з підвищенням температури зростає міцність від 60 до 220 МПа.

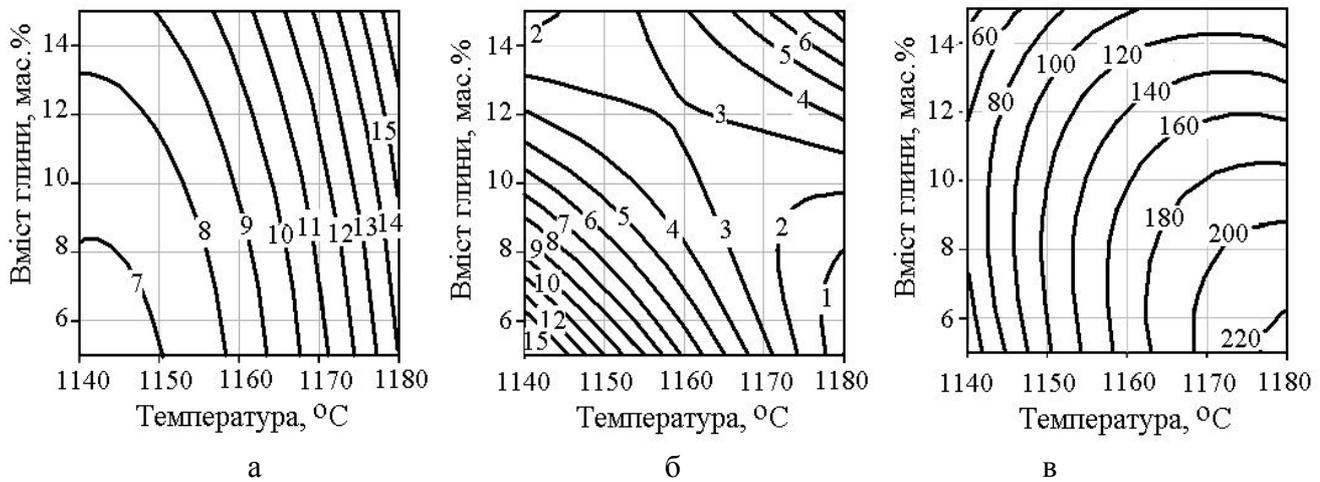


Рис. 4 – Вплив вмісту глини та температури випалу на: а – повну усадку (%), б – водопоглинання (%), в – міцність дослідних керамічних зразків (МПа).

З рис. 5 видно, що при аналогічному плануванні експерименту з введенням до складу мас бентоніту, спостерігається аналогічна тенденція поведінки керамічних зразків, як і при введенні каоліну та глини: при підвищенні температури випалу збільшується повна усадка від 10 до 16 % (показники вищі, оскільки саме в бентоніті найбільша кількість Fe_2O_3).

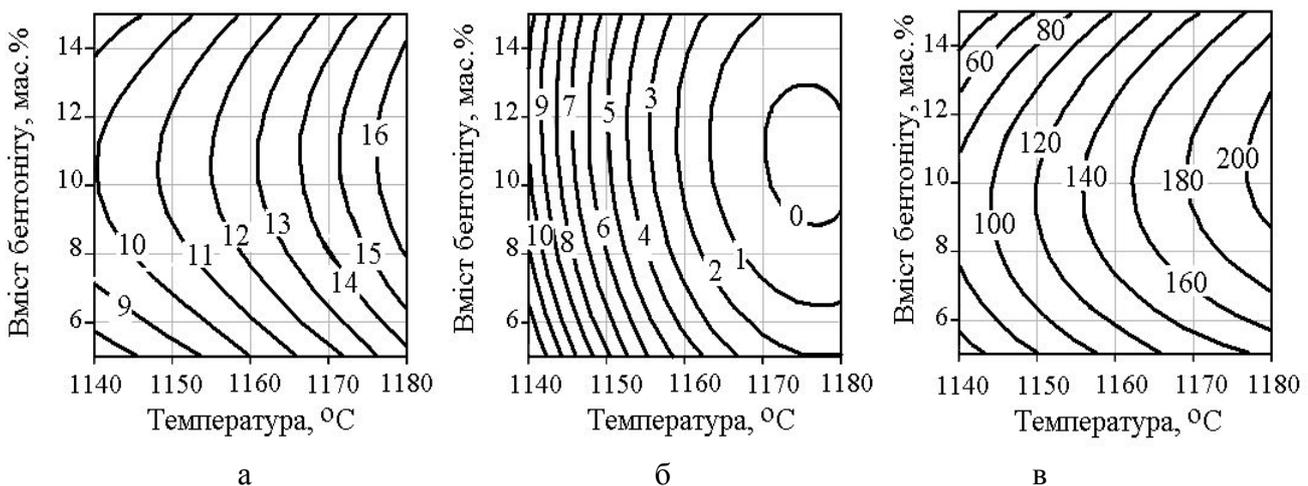


Рис. 5 – Вплив вмісту бентоніту та температури випалу на: а – повну усадку (%), б – водопоглинання (%), в – міцність дослідних керамічних зразків (кг/см²).

Водопоглинання зменшується від 11 % після випалу при 1140 °С до 0 – при 1170 – 1180 °С і вмісті бентоніту 10 – 13 %.

При більш високому вмісті каоліну і температурі випалу 1180 °С прояв-

ляється тенденція до спучування дослідних зразків. Також з підвищенням температури зростає міцність від 80 до 200 МПа, але ці значення для зразків з додаванням бентоніту набагато нижчі, оскільки утворення надмірної кількості склофази, що стимулюється підвищеним вмістом мінералів-плавнів у бентоніті, знижує механічну міцність.

Опір стиранню визначали вибірково для дослідних зразків і цей показник склав, $\text{см}^3/50 \text{ см}^2$: для зразків з 10 та 15 мас. % каоліну після випалу при 1160 °С – відповідно 13 та 17; для зразків з 15 мас. % глини після випалу при 1140 °С – 31; для зразків з 5 мас. % бентоніту після випалу при 1180 °С – 20. Отже, кращий опір стиранню мають зразки з додаванням каоліну.

Заключення. Проведені дослідження показали можливість одержання керамічних матеріалів на основі гранітного пилу з додаванням до 15 % глинистих матеріалів. Такі маси придатні для формування керамічних виробів методом напівсухого пресування. Найбільш високі показники за міцністю одержані при введенні каоліну мурзинського, менші – при додаванні бентоніту. Найбільш раціональним є введення 10 % каоліну мурзинського та температура випалу даних зразків – 1170 °С, який дозволяє отримати матеріал з характеристиками: повна усадка – 11,5 %, водопоглинання – 2 – 3 %, механічна міцність – до 250 МПа, зносостійкість $13 \text{ см}^3/50 \text{ см}^2$

Список літератури: 1. Мороз И.И. Технология строительной керамики / И.И. Мороз. – М.: Стройиздат, 1972. – 367 с. 2. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учебное пособие для вузов / В.Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1984. – 80 с. 3. Августиник А.И. Керамика / А.И. Августиник. – Л.: Стройиздат, 1975. – 550 с. 4. Кройчук Л. Новый европейский стандарт на клинкерный дорожный кирпич / Л. Кройчук // Строительные материалы. – 2003. – № 9. – 42 – 43 с. 5. Юшкевич О.М. Технология керамики / М.О. Юшкевич, М.И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1969. – 194 с. 6. Бобкова Н.М. Физическая химия силикатов / Н.М. Бобкова. – Мн.: Высшая школа, 1977. – 266 с. 7. Будівельні матеріали. Сировина глиниста для виробництва керамічних будівельних матеріалів. Класифікація: ДСТУ БВ. 2.7-60-97. – [Введ. 1997-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2007. – 15 с. 8. Иванова В.П. Термический анализ минералов и горных пород / [В.П. Иванова, Б.К. Касатов, Т.Н. Красавина и др.]. – Л.: Недра, 1974. – 399 с. 9. Кондратенко, В.А. Технологическая линия для производства керамического кирпича, полусухого прессования / В.А. Кондратенко, В.Н. Пешков, Д.В. Сиеднев // Мир техники и технологии. – 2007. – № 12. – 73 с. 10. Практикум по технологии керамики: учеб. пособие для вузов / [под ред. проф. Я.И. Гузмана]. – М.: ООО РИФ «Стойматериалы», 2005. – 336 с. 11. Ахназарова, С.А. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.А. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1978. – 319с.

Надійшла в редколегію 20.08.12

Керамічні маси для виготовлення клинкерної тротуарної плитки / О.С. МИХАЙЛЮТА, В.В. КОЛЕДА, Є.В. АЛЕКСЄВ, В.В. СЕМ'ЯНИСТА // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 86 – 94. – Бібліогр.: 11 назв.

Установлена возможность получения клинкерной керамики по энерго- и ресурсосберегающей технологии. С использованием гранитной пыли и глинистого сырья разработаны керамические массы, которые предназначены для формовки высокопрочных керамических изделий методом полусухого прессования. Полученная после обжига при 1170 °С опытная керамика имеет следующие характеристики: полная усадка до 11,5 %, водопоглощение – 2 – 3 %, механическая прочность при сжатии – до 250 МПа, износостойкость 13 – 17 см³/50 см².

The possibility of obtaining ceramic clay pavers for energy- and resource-saving technologies was established. The ceramic masses for production the pavers on the base of granite dust and clay raw materials for molding by pressing method were elaborated. The experimental ceramic samples after burning at 1170 °C have the following characteristics: the full shrinkage to 11.5%, the water absorption 2 – 3 %, the mechanical compressive strength – up to 250 МПа, the wear resistance 13 – 17 cm³/50 cm².

О.А. КОРНИЕНКО, ИПМ НАНУ имени И.Н. Францевича, Киев

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И СВОЙСТВА ФАЗ В СИСТЕМЕ CeO₂ – Gd₂O₃ ПРИ 600 °С

Впервые изучены фазовые взаимодействия в системе CeO₂ – Gd₂O₃ при температуре 600 °С. Новых фаз в системе обнаружено не было. В системе существуют области твердых растворов на основе кубических (С и F) модификаций оксидов редкоземельных элементов.

Система с оксидами церия и гадолиния является перспективной для разработки альтернативных материалов теплозащитных покрытий и топливных ячеек [1, 2]. Кроме того, эта система может быть широко использована в ядерной энергетике для создания безопасных и надежных технологий утилизации отходов атомной промышленности и развития нового поколения реакторов [3 – 7]. Диаграмма состояния системы на основе оксидов церия и гадолиния представляет интерес, как с научной, так и практической точки зрения.

Ранее были изучены фазовые равновесия, в указанной системе, при температурах 1500, 1100 °С [8 – 9]. Установлено, что в системе образуются три

© О.А. Корниенко, 2012

типа твердых растворов: кубической структуры на основе флюорита F – CeO₂ и C – Gd₂O₃, а также моноклинной модификации B – Gd₂O₃, которые разделены двухфазными полями (F + C) и (C + B), соответственно. При снижении температуры до 1100 °С количество фазовых полей в системе уменьшается, в связи с тем, что моноклинная модификация оксида гадолиния существует при температурах выше ~ 1250 °С [10].

Цель настоящей работы – изучение взаимодействия и физико-химических свойств образующихся фаз в двойной системе CeO₂ – Gd₂O₃ при температуре 600 °С. В качестве исходных веществ использовали азотнокислую соль церия Ce(NO₃)₃·6H₂O марки Ч, азотную кислоту марки ЧДА и Gd₂O₃ с содержанием основного компонента не менее 99,99 %. Образцы готовили с концентрационным шагом 1 – 5 мол. % из растворов нитратов выпариванием с последующим разложением нитратов на оксиды путем прокаливания при 1200 °С в течение 2 ч. Порошки прессовали в таблетки диаметром 5 и высотой 4 мм под давлением 10 МПа. Образцы обжигали на воздухе в печи с нагревателями Н23У5Т (фехраль), (21210 ч). Обжиг был непрерывным. Скорость подъема температуры составляла 3,5 град/мин. Фазовый состав образцов исследовали методами рентгеновского и микроструктурного анализов.

Рентгенофазовый анализ образцов выполняли методом порошка на установке ДРОН-1,5 при комнатной температуре (CuK_α-излучение). Скорость сканирования составляла 1 – 4 град/мин в диапазоне углов 2θ = 15 – 80°. Периоды кристаллических решеток рассчитывали методом наименьших квадратов, используя программу LАТТІС, с погрешностью не ниже 0,0004 нм для кубической фазы. Состав образцов контролировали с помощью спектрального и химического анализов выборочно.

Определение рентгеновской плотности проводили, исходя с массы m_{ek} и объема элементарной ячейки:

$$\gamma = \frac{1,6604 \cdot M \cdot Z}{V_{ek}}, \quad (1)$$

где M – молекулярный вес сложного оксида, г.; Z – число формульных единиц в элементарной ячейке; V_{ek} – объем элементарной ячейки, Å³.

Объем элементарной ячейки твердых растворов определяли с использованием данных расчета параметром элементарной ячейки, полученных рент-

геновским методом. Кубическая сингония:

$$V_{ek} = a^3 \quad (2)$$

Исследование твердофазного взаимодействия CeO_2 (тип флюорита, F) и Gd_2O_3 (кубическая модификация оксидов РЗЭ, С) показало, что в системе $\text{CeO}_2 - \text{Gd}_2\text{O}_3$ образуются два типа твердых растворов: кубической структуры на основе флюорита F – CeO_2 и С – Gd_2O_3 , которые разделены между собой двухфазным полем (F + С).

Исходный химический и фазовый состав образцов, обожженных при 600 °С, периоды кристаллических решеток фаз, находящихся в равновесии при заданной температуре, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Фазовый состав и параметры элементарных ячеек фаз после обжига образцов системы $\text{CeO}_2 - \text{Gd}_2\text{O}_3$ при 600 °С, 21210 ч (по данным РФА)

Химический состав, мол. %		Фазовый Состав	Параметры элементарных ячеек фаз, нм ($a \pm 0,0002$)	
CeO_2	Gd_2O_3		<F>	<C>
			a	a
0	100	<C>	–	1,0790
1	99	<C>	–	1,0785
2	98	<C>	–	1,0802
3	97	<C>	–	1,0802
4	96	<C>	–	1,0795
5	95	<C>	–	1,0779
10	90	<C> + <F>	0,5392	1,0784
15	85	<C> + <F>	0,5392	1,0784
20	80	<C> + <F>	0,5392	1,0784
25	75	<C> + <F>	0,5392	1,0771
30	70	<C> + <F>	0,5397	1,0795
35	65	<C> + <F>	0,5397	1,0784
40	60	<C> + <F>	0,5397	1,0785
45	55	<C> + <F>	0,5392	1,0784
50	50	<C> + <F>	0,5403	1,0785
55	45	<C> + <F>	0,5392	1,0783
60	40	<C> + <F>	0,53909	1,0779
65	35	<C> + <F>	0,5403	1,0806
70	30	<C> + <F>	0,5398	1,0795
75	25	<C>сл. + <F>осн	0,5415	–
80	20	<F>	0,5415	–
100	0	<F>	0,5409	–

При температуре 600 °С установить точно границу области гомогенности F – CeO₂ не удалось.

Исходя из того, что образец состава 80 мол. % CeO₂ – 20 мол. % Gd₂O₃ содержит незначительные следы кубической C – фазы, можно предположить, что граница области гомогенности <F – CeO₂> не изменится по сравнению с более высокими температурами, или изменится незначительно, и будет проходить вблизи составов, содержащих ~ 10 – 15 мол. % Gd₂O₃ (табл. 1).

Граница области гомогенности кубической C фазы в равновесии с F – CeO₂ при 600 °С приведена по данным РФА и соответствует составу, содержащему 10 мол. % CeO₂.

Параметры элементарной ячейки C – фазы изменяются от $a = 1,0790$ нм для чистого Gd₂O до $a = 1,0784$ нм для двухфазного образца (C+F), содержащего 10 мол. % CeO₂ – 90 мол. % Gd₂O₃.

Некоторые свойства кубического твердого раствора на основе C – Gd₂O₃, полученные в данном исследовании, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства твердого раствора C – Gd₂O₃ в системе CeO₂ – Gd₂O₃ при температуре 600 °С

Состав твердого раствора	Объем элементарной ячейки, нм ³	Теоретическая плотность, $\gamma_{\text{теор}}$. (по данным РФА)
Gd ₂ O ₃	1,2562	4,859
Ce _{0.99} Gd _{0.01} O _{1.995}	1,2544	2,544
Ce _{0.98} Gd _{0.02} O _{1.99}	1,2604	2,505
Ce _{0.97} Gd _{0.03} O _{1.985}	1,2604	2,502
Ce _{0.96} Gd _{0.04} O _{1.98}	1,2579	2,513
Ce _{0.95} Gd _{0.05} O _{1.975}	1,2523	2,599

Выводы: Изучены фазовые взаимодействия в системе CeO₂ – Gd₂O₃ при 600 °С. Для исследованной системы характерно образование ограниченных твердых растворов на основе различных кристаллических модификаций исходных компонентов. Полученные данные могут быть использованы для выбора оптимальных составов и разработки твердого электролита в кислородных газовых датчиках и топливных ячейках, функционирующих при умеренных температурах.

Автор выражает признательность Украинскому Государственному Фонду Фундаментальных Исследований за финансовую поддержку настоящей работы (грант «ДФФД-РФФИ-2012 № Ф 40.3/038-2012 по договору Ф40/204-2012; I-4-12)

Список литературы: 1. *Godikemeiker M.* Electrochemical characteristics of cathodes in solid oxide fuel cells based on ceria electrolytes / *M. Godikemeiker, K. Sasaki, L.J. Guackler* // *Journal Electrochem. Soc.* – 1997. – № 144. – P. 1635 – 1646. 2. *Jadhav L.D.* Synthesis of nanocrystalline Gd doped ceria by combustion technique / [*L.D. Jadhav, M.G. Chourashiya, R.M. Subhedra et al.*] // *Jornal of Alloy and Compaunds.* – 2009. – № 490. – P. 3893 – 3896. 3. *Yi Liu.* Dielectric and electrical properties of gadolinia doped ceria / *Yi Liu* // *Jornal of Alloy and Compaunds.* – 2008. – № 479. – P. 769 – 771. 4. *Stelzer N.* Phase Diagram of Nonstoichiometric 10 mol. % Gd_2O_3 – Doped Cerium Oxide Determined from Specific Heat Measurements / *N. Stelzer, J. Nörling, I. Riess* // *Journal of Solid State Chemistry.* – 1995. – Vol. 117. – P. 392 – 397. 5. *Grover V.* Phase relations, lattice thermal expansion in CeO_2 – Gd_2O_3 system, and stabilization of cubic gadolinia / *V. Grover, A.K. Tyagi* // *Materials Research Bulletin.* – 2004. – Vol. 39. – P. 859 – 866. 6. *Balaji P.* Phase relations, lattice thermal expansion in $Ce_{1-x}Eu_xO_{2-x/2}$ and $Ce_{1-x}Sm_xO_{2-x/2}$ systems and stabilization of cubic RE_2O_3 (RE: Eu, Sm) / *Balaji P., Grover V., Tyagi A.K.* // *Materials Science and Engineering.* – 2006. – № 430. – P. 120 – 124. 7. *Tianshu Zhang* Ionic conductivity in the CeO_2 – Gd_2O_3 system ($0,05 \leq Gd / Ce \leq 0,4$) prepared by oxalate coprecipitation / [*Zhang Tianshu, Peter Hing, Haitao Huang et al.*] // *Solid State Ionics.* – 2002. – Vol. 148. – P. 567 – 573. 8. *Корниенко О.А.* Взаимоднйствие и свойства фаз в системе CeO_2 – Gd_2O_3 при 1500 °C / *О.А. Корниенко* // *Вісник НТУ«ХП».* – 2009. – № 45. – С. 86 – 90. 9. *Корниенко О.А.* Взаимоднйствие и свойства фаз в системе CeO_2 – Gd_2O_3 при 1100 °C / *О.А. Корниенко* // *Вісник НТУ«ХП».* – 2010. – № 66. – С. 14 – 18. 10. *Traverse J.P.* Etude du Polymorphisme des sesquioxides de terres rares/ *J.P. Traverse.* – Grenoble: These, 1971. – 150 с.

Поступила в редколлегию 17.08.12

УДК 621.762

Взаимодействие и свойства фаз в системе CeO_2 – Gd_2O_3 при 600 °C / О.А. КОРНИЕНКО
// *Вісник НТУ «ХП».* – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 94 – 98. – Библиогр.: 10 назв.

Вперше вивчено фазові взаємодії в системі CeO_2 – Gd_2O_3 при температурі 600 °C. Нові фази в системі не виявлено. В системі існують області твердих розчинів на основі кубічних (С і F) модифікацій оксидів рідкоземельних елементів.

First there have been studied phase equilibria in the system CeO_2 – Gd_2O_3 at 600 °C. No new phases were found. The fields of solid solutions based on cubic (C and F) modifications of rare-earth oxides were revealed in the system.

С.В. ЛЕНИЧ, асп., ст. препод., ВНУ им. В. Даля, Луганск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ УГЛЯ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕЙ УСТАНОВКЕ

В статье приведены варианты конструктивного исполнения пневмотранспортной измельчающей установки, совмещающей процесс пневмотранспортирования с измельчением сыпучих материалов и предназначенной для приготовления пылеугольной смеси для факельного сжигания в теплоэнергетических установках. Представлены результаты теоретического и экспериментального исследований измельчения антрацита в разработанном устройстве.

Постановка проблемы. В настоящее время на ТЭС Украины широко применяется пылевидный уголь. Одним из важнейших факторов эффективности использования твёрдого топлива на ТЭС и в котельных является тонкость его помола перед подачей к горелкам.

В теплоэнергетике Украины утонение помола особенно важно, так как для факельного сжигания в основном используются низкорреакционный антрацит и тощий уголь, а тонкий помол позволяет в значительной степени компенсировать отрицательное влияние малого выхода летучих ускорением горения твёрдых частиц благодаря развитой поверхности.

Таким образом, создание более эффективных и менее энергоёмких способов и технологий измельчения угля для сжигания представляет собой весьма важную, актуальную научно-производственную и техническую задачу.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ мирового развития тонкого измельчения показывает, что наиболее эффективными являются измельчители ударного действия [1 – 5]. Это, прежде всего мельницы, основанные на пневматических способах измельчения: пневматические, струйные (газоструйные), струйно-роторные и др. При этом разрушение частиц осуществляется за счёт удара о размольную плиту или друг с другом.

Цель статьи. Целью данной работы является исследование процесса измельчения угля в пневмотранспортных измельчающих установках, совмещающих процесс пневмотранспорта с измельчением сыпучих материалов.

Изложение основного материала. Для создания экономичного способа приготовления угольной пыли нами предлагается осуществлять измельчение

угля в процессе его пневмотранспорта. Измельчение осуществляется путем разгона частиц потоком воздуха и удара их об отбойные элементы колен пневмотранспортной измельчающей установки [6]. При этом измельчение частиц материала, обычно относимое к недостаткам пневмотранспорта, в данном случае играет положительную роль.

На кафедре «Транспортные системы» ВНУ им. В. Даля разработано два варианта конструкции пневмотранспортной измельчающей установки. Первый вариант (рис. 1) представляет собой зигзагообразный измельчительный трубопровод, устанавливаемый в линейную часть трубопроводов, транспортирующих уголь.

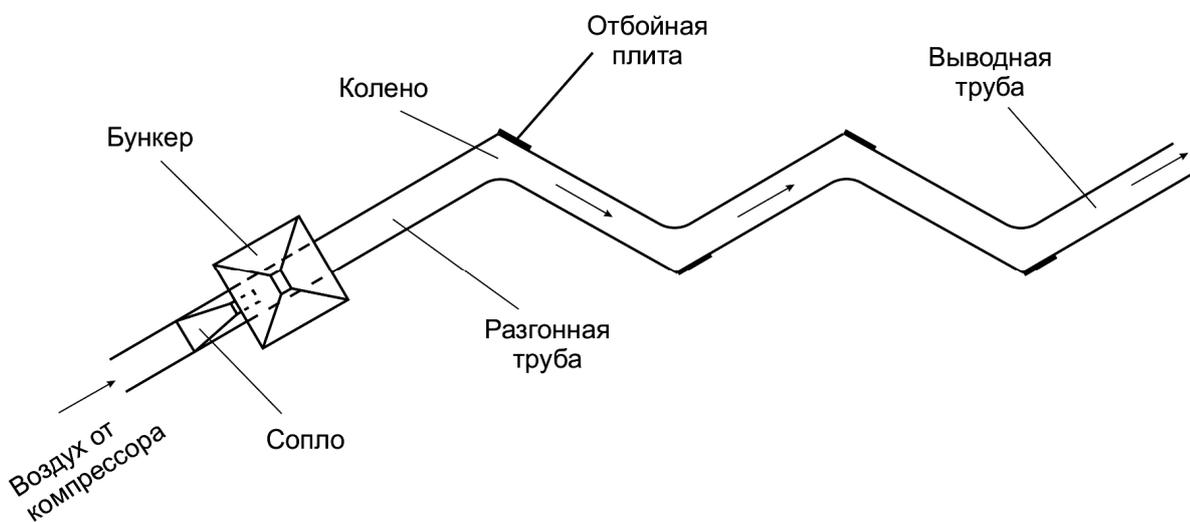


Рис. 1 – Зигзагообразный измельчительный трубопровод (вид сверху)

Второй вариант (рис. 2) предполагает использование измельчающей установки, в виде вертикального змеевика с П-образными коленами. Наличие дополнительных сопел поддува в нижней части П-образных колен препятствует завалу материала и увеличивает скорость аэросмеси после каждого поворота.

Путь непрерывного движения материала в предлагаемом устройстве во много раз больше чем у существующих пневматических мельниц. Степень измельчения регулируется скоростью потока и числом колен. Предлагаемое устройство конструктивно чрезвычайно просто и позволяет совместить процессы пневмотранспорта и измельчения материала.

В работе [7], на основе закона Ребиндера с использованием теории удара получено выражение для определения прироста поверхности при ударе о неподвижную преграду кубообразной (щебневидной) частицы сыпучего мате-

риала:

$$\Delta S = \frac{d^3}{2 \cdot k_r} \cdot \left[\frac{\rho \cdot V_u^2}{g} (1 - \sin^2 \alpha - k_e^2 \cdot \cos^2 \alpha) - \frac{\sigma_p}{E} \right], \quad (1)$$

где ΔS – прирост поверхности, м^2 ; d – средний размер (ребра) кубообразной частицы, м ; k_r – эмпирический коэффициент пропорциональности, представляющий собой затраты энергии на создание единицы новой поверхности, $\text{Дж}/\text{м}^2$; ρ – удельный вес материала, $\text{Н}/\text{м}^3$; V_u – скорость частицы в момент удара, $\text{м}/\text{с}$; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; k_e – коэффициент восстановления при ударе, зависящий от формы и физико-механических свойств сталкивающихся тел, $0 < k_e < 1$; α – угол между нормалью к неподвижной поверхности и направлением удара (угол атаки); σ_p – предельное напряжение упругих деформаций (предел прочности материала), $\text{Н}/\text{м}^2$; E – модуль Юнга, $\text{Н}/\text{м}^2$.

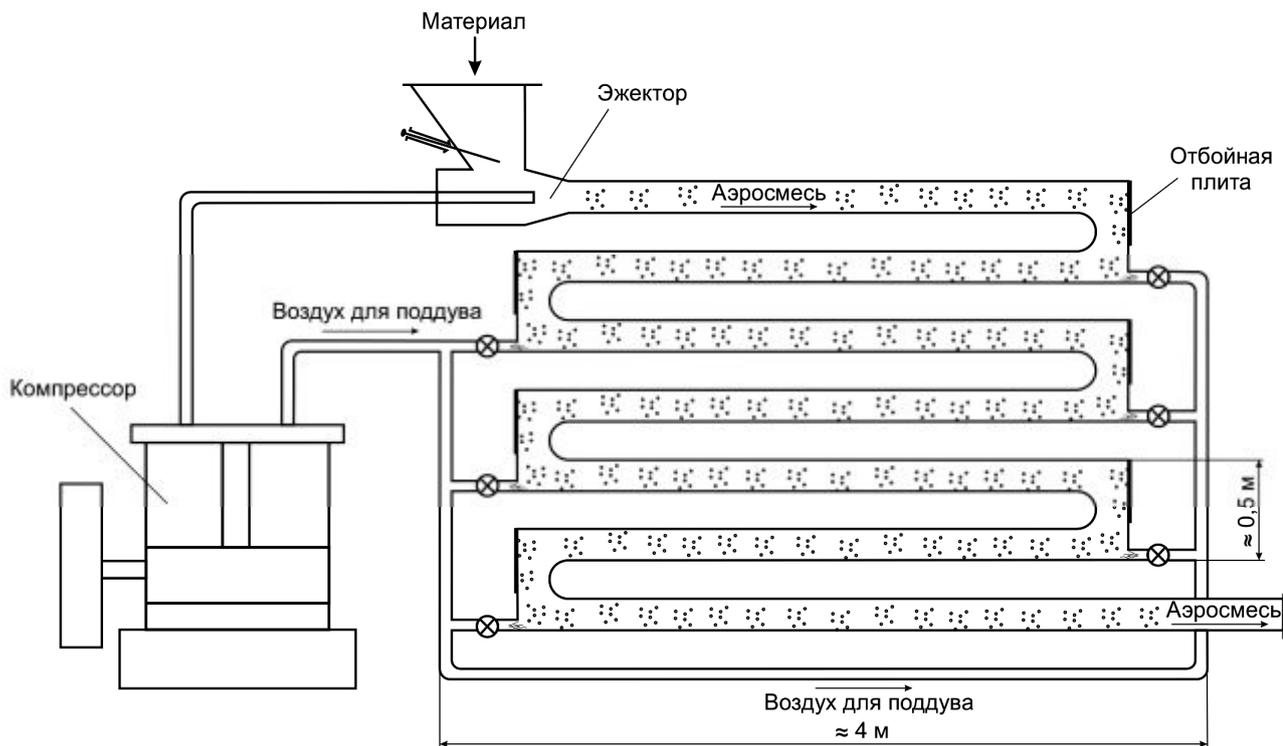


Рис. 2 – Вертикальный измельчительный змеевик (общий вид)

Измельчение антрацита осуществляется путём нескольких последовательных ударов частиц о внешнюю стенку колен трубопровода. После каждого удара угольная пыль – полидисперсна, т.е. состоит из частиц различного

размера. Поэтому при измельчении множества частиц в потоке пневмотранспорта предложено определять прирост удельной поверхности ΔS_m (отношение прироста поверхности ΔS к массе измельчаемого материала) угольной пыли после прохождения колена трубопровода.

С учётом (1) получено выражение:

$$\Delta S_m = \frac{1}{2 \cdot k_r \cdot k_{cm}} \cdot \left[V^2 (1 - \sin^2 \alpha - k_g^2 \cdot \cos^2 \alpha) - \frac{\sigma_p^2 \cdot g}{E \cdot \rho} \right], \quad (2)$$

где k_{cm} – коэффициент, учитывающий затраты энергии расходуемой на процессы, сопровождающие образование новой поверхности (трение и удары между частицами, придание разделяющимся частям кинетической энергии и т.д.).

Коэффициент k_{cm} зависит от скорости пневмосмеси V , угла поворота колена трубопровода δ , массовой концентрации μ и удельной поверхности S_m частиц угольной пыли перед ударом.

Полученная математическая модель требует уточнения, для чего были проведены экспериментальные исследования измельчения антрацита в пневмотранспортной измельчающей установке в зависимости от конструктивных и технологических параметров.

Методика экспериментального исследования описана в работе [8].

В результате обработки экспериментальных данных было получено уравнение для нескольких последовательных ударов:

$$\Delta S_{m_i} = -2,66 + 0,2165V + 0,06\delta - 1,7875\mu - 0,2 \left[S_{m_0} + \sum_{i=2}^n \Delta S_{m_{i-1}} \right], \quad (3)$$

где ΔS_{m_i} – прирост удельной поверхности после i -го удара, $\text{м}^2/\text{кг}$; S_{m_0} – первоначальная удельная поверхность угольной пыли, $\text{м}^2/\text{кг}$; i – номер удара (цикла измельчения); n – общее количество ударов (циклов измельчения).

На графике (рис. 3) представлена зависимость $\Delta S_m = f(S_m)$, определённая по уравнению (3) для первых 5-ти ударов и показано сравнение с экспериментальными точками.

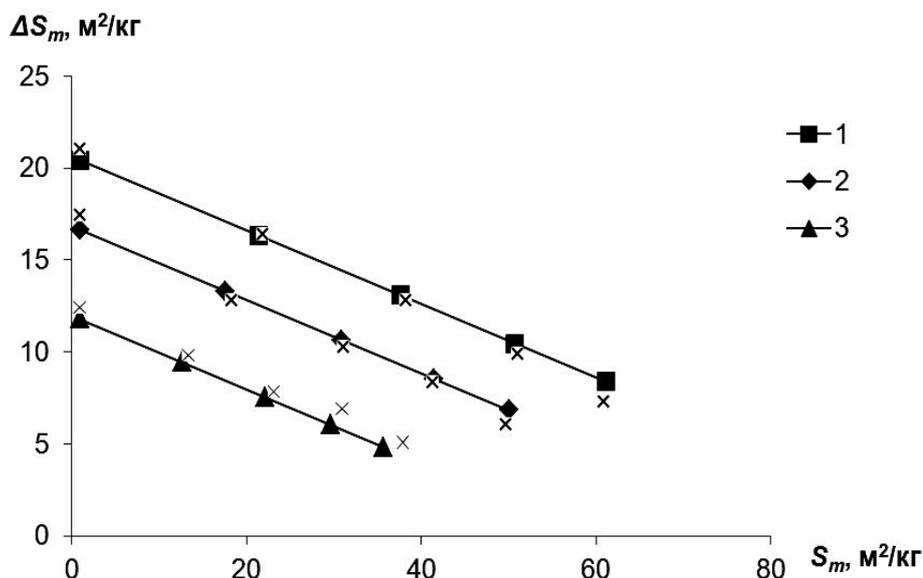


Рис. 3 – График зависимости $\Delta S_m = f(S_m)$: 1 – $V = 90$ м/с, $\delta = 75^\circ$, $\mu = 0,4$ кг/кг; 2 – $V = 70$ м/с, $\delta = 90^\circ$, $\mu = 0,6$ кг/кг; 3 – $V = 50$ м/с, $\delta = 75^\circ$, $\mu = 0,4$ кг/кг; \times – экспериментальные точки.

Выводы.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали полную работоспособность предлагаемого устройства, значительное снижение энергоемкости процесса измельчения угля, возможность обогащения угольной пыли, достаточную производительность.

Так, при скорости углевоздушной смеси $V = 90$ м/с и массовой концентрации $\mu = 0,8$ кг/кг на пневмотранспортной измельчающей установке с коленом $\delta = 75^\circ$ после 5 ударов получена угольная пыль, с остатком на сите $R_{90} = 32\%$, а после 8 ударов – $R_{90} = 9\%$.

Список литературы: 1. Гуюмджян П.П. Интенсификация процессов тонкого измельчения, механической активации твёрдых материалов с разработкой высокоэффективных машин и технологий для переработки отходов промышленности: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.13 / Перч Погосович Гуюмджян. – Иваново: ИСХИ, 1989. – 406 с. 2. Дмитриева Л.А. Исследование процесса измельчения хрупких материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» / Л.А. Дмитриева. – Иваново: ИГАСУ, 2006. – 165 с. 3. Земсков Е.П. Теоретическое исследование процесса высокодисперсного ударного разрушения одиночной частицы / [Е.П. Земсков, А.И. Зайцев, В.А. Васильев и др.] // Интенсивная механическая технология сыпучих материалов: межвуз. сб. научн. тр. – Иваново: ИХТИ, 1990. – С. 38 – 42. 4. Белов Н.Н. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления / [Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница и др.] – Томск: STT, 2005. – 360 с. 5. Peter M. Silverberg. Homing on the best size reduction method / Peter M. Silverberg, Stephan Miranda Sharon, Yaeger Hosokawa // Micron Powder System. Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 105, № 12. – P. 102. 6. Пат. № 44274 Украина, МПК В02С 19/00, В02С 23/06. Подрібнювач / Турушин В.О., Нечаєв Г.І., Леніч С.В.. – заявл. 05.05.09; опубл. 25.09.09, Бюл.

№ 18. **7.** Турушин В.О. Закономірності руйнування сипких матеріалів в подрібнювачах ударної дії / В.О. Турушин, С.В. Ленич // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2009. – № 5 (135). – С. 11 – 15. **8.** Ленич С.В. Методика експериментального дослідження измельчення угля в пневмотранспортній измельчаючій установці / С.В. Ленич, В.А. Турушин, В.В. Ставцев // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2011. – № 5 (159), Ч. 2. – С. 319 – 325.

Поступила в редколлегию 25.08.12

УДК 621.926

Исследование процесса измельчения угля в пневмотранспортной измельчающей установке / С.В. ЛЕНИЧ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 99 – 104. – Библиогр.: 8 назв.

У статті наведено варіанти конструктивного виконання пневмотранспортної подрібнювальної установки, що суміщає процес пневмотранспортування з подрібненням сипких матеріалів і призначеної для приготування пиловугільної суміші для факельного спалювання в теплоенергетичних установках. Представлено результати теоретичного і експериментального досліджень подрібнення антрациту в розробленому пристрої.

The modification of pneumatic transport mills, combining the process of pneumatic transport with milling of dry materials and intended for pulverized coal preparation for flaring in the burners are presented in the paper. The results of theoretical and experimental researches of anthracite milling in the developed device are adduced.

А.А. МАЛЬГОТА, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудн.,
УкрНИИМТ, Одесса,

В.А. ПРОХОРОВ, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудн.,
УкрНИИМТ, Одесса,

А.В. ШОСТАК, инж., КМ Labs, Киев

ЗАМКНУТЫЙ ЦИКЛ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлены результаты разработки технологической линии замкнутого цикла дробления и измельчения твердых материалов с возможностью многократного возврата частиц вещества в измельчительное устройство.

Обычная схема дробления и пылеудаления материалов строится по принципу открытого цикла измельчения.

При этом неизбежно часть пылеобразного материала выбрасывается воздушным потоком в окружающее пространство.

Выброшенные частицы материала могут быть источником опасности для окружающей среды и здоровья человека.

Особенно это относится к измельчению вредных материалов и обязывает создавать замкнутые циклы дробления [1].

Организация замкнутого цикла подачи исходных материалов, измельчение, пылеудаление и пакетирование измельченного материала требует применение определенных технических решений и соответствующей организации технологического процесса.

В настоящей работе представлены результаты разработки технологической линии замкнутого цикла дробления и измельчения твердых материалов с возможностью многократного возврата частиц вещества в измельчительное устройство.

В состав технологической линии входит вихревая мельница [2], центробежный сепаратор [3], циклон, осадочная камера, ресивер, компрессор и др. Все устройства последовательно соединены трубопроводом.

Дополнительно использовалось следующее оборудование: устройство предварительного дробления исходного материала и устройство пакетирования.

© А.А. Мальгота, В.А. Прохоров, А.В. Шостак, 2012

Для получения субмикронной (ультрадисперсной) фракции на данной технологической линии материал необходимо предварительно подробить и измельчить до фракции 100 мкм.

Дальнейшее измельчение происходит в вихревой мельнице за счет резонансных явлений.

Работа вихревой мельницы обеспечивается рядом факторов: рабочее давление энергоносителя от 4 до 8 Атм, расход энергоносителя не менее 300 м³/час, входящий размер материала не более 10 мм.

После измельчения материал движется к центробежному сепаратору и за счет центробежных сил разделяется на фракции.

Крупные частицы возвращаются на дополнительный помол, а измельченные – на аппараты пылеулавливания.

Энергоноситель очищается через фильтры (до 20 мг/м³) и подается на компрессор.

Отличительная особенность данного устройства состояла в возможности многократного возвращения измельчаемого материала из центробежного сепаратора в вихревую мельницу до достижения частицами определенных размеров (рисунок).

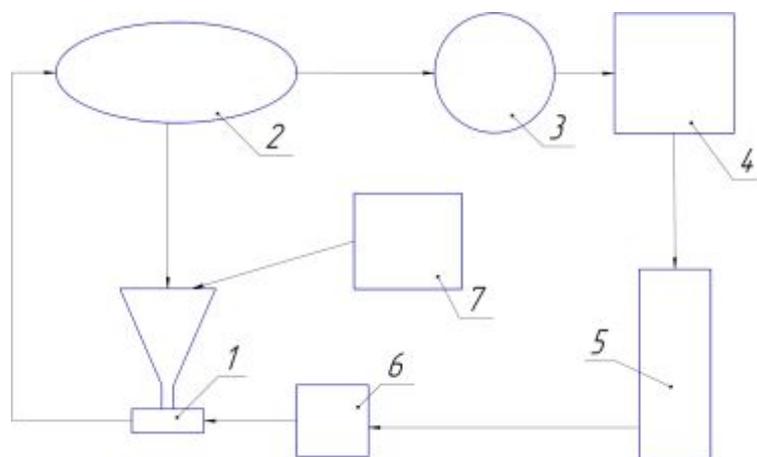


Рис. – Принципиальная схема измельчения твердых материалов замкнутого цикла: 1 – вихревая мельница; 2 – центробежный сепаратор; 3 – циклон; 4 – электрофильтр; 5 – рукавный фильтр; 6 – компрессор; 7 – аппарат предварительного дробления и измельчения.

Технологическая линия позволяет использовать различные газовые энергоносители при измельчении материалов.

Список литературы: 1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: «Химия» 1973. – 750 с. 2. Пат. № 2100082 Российская Федерация,

МПК В 02 С 19/06. Способ измельчения материалов в потоке энергоносителя и устройство помола для его осуществления / Шостак В.В., Кулаков М.П.; заявитель и патентообладатель Шостак В.В., Кулаков М.П. – № 96109854/03; заявл. 14.05.96; опубл. 27.12.97. 3. Пат. №2016665 Российская Федерация, МПК В 04 С 1/00. Центробежный сепаратор / Буров А.А., Буров А.И., Котляревский П.А., Кошур Н.Х., Мальгота А.А.; заявитель Буров А.А.; Буров А.И.; Котляревский П.А.; Кошур Н.Х.; Мальгота А.А.; патентообладатель Буров А.И. – № 4943501/26; заявл. 10.06.91; опубл. 30.07.94.

Поступила в редколлегию 30.08.12

УДК 621.926.086

Замкнутый цикл измельчения твердых материалов / А.А. МАЛЬГОТА, В.А. ПРОХОРОВ, А.В. ШОСТАК // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 104 – 107. – Библиогр.: 8 назв.

Представлені результати розробки технологічної лінії замкнутого циклу дроблення і подрібнення твердих матеріалів з можливістю багатократного повернення частинок речовини в подрібнювальний пристрій.

Presents the results of a closed-cycle production line of crushing and grinding hard materials with the ability to return multiple particles of matter in the grinding device.

УДК 622.781

И.К. МЛАДЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф.,
ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск,
Э.М. ПАЙВА, Горнорудное общество «Катока», Ангола

РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ В ПУЛЬПЕ

Рассматривая механическое перемещение частицы ферромагнетика в вязкой среде под действием внешнего магнитного поля, получен закон движения ее, и определена частота изменения внешнего магнитного поля, когда частица существенно отстает по фазе от вектора внешнего магнитного поля, что обуславливает возможность ее размагничивания в пульпе.

Введение. Магнитная сепарация предполагает намагничивание ферро-частиц до насыщения. После выхода их из зоны сепарации они принимают остаточную намагниченность, что влечет за собой их флокуляцию. В резуль-

© И.К. Младецкий, Э.М. Пайва, 2012

тате нерудная фаза в виде открытых нерудных частиц остается во флокулах и в дальнейшем практически не выводится в обедненный продукт. Таким образом, необходима промежуточная операция, которая бы размагничивала частицы и пульпа была бы представлена отдельными частицами, а не агрегатами частиц.

Постановка задачи. Задача размагничивания тонких частиц в пульпе решалась путем создания размагничивающих аппаратов, в которых амплитуда напряженности переменного магнитного поля снижалась от напряженности насыщения магнетита до нуля от входа пульпы в аппарат до ее выхода. Пульпа свободным потоком проходила через этот аппарат. Частота магнитного поля была 50 Гц. Флокулы уменьшали свои размеры по сравнению с размерами в постоянном магнитном поле разделения сепаратора. Это явление способствовало освобождению нерудных частиц из флокул, поэтому предполагалось, что происходит размагничивание частиц. Никакие физические способы определения остаточной напряженности частиц и флокул не проводились. Заключение об эффекте размагничивания проводилось по результатам дальнейшей сепарации: чем больше разность качества обогащенного продукта в двух приемах сепарации с применением размагничивающего аппарата, тем больше эффект размагничивания. Аппараты называли размагничивающими и в промышленности стали их использовать перед сепарацией, если пульпа уже прошла операцию разделения в магнитном поле. На наш взгляд это не было размагничиванием.

Исследование поведения феррочастиц в магнитном поле различной частоты [2] показало, что отдельные частицы появляются в полях свыше 500 Гц. В полях 50 Гц флокулы только лишь переориентируются. Таким образом, размагничивания не наблюдается. Рассмотрим с теоретической точки зрения какие же частоты магнитного поля будут удовлетворять условиям размагничивания.

Математическая модель. Размагничивание ферромагнитного образца производится следующим образом. Образец жестко закрепляется в пространстве, где будет наведено магнитное поле. Ориентация образца такая, что ось легкого намагничивания располагается параллельно вектору внешнего магнитного поля.

Устанавливается напряженность поля, соответствующая насыщению образца.

Производится многократное изменение направления вектора напряжен-

ности. В результате образец будет иметь остаточную намагниченность, которая располагается на кривой начального намагничивания.

Уменьшается амплитуда напряженности и процедура повторяется. Так поступают до уменьшения напряженности до нуля. В результате образец будет полностью размагничен. Основным условием размагничивания является жесткое его положение в изменчивом магнитном поле. Когда образец не закреплен, то он стремится изменить свое положение в соответствии с изменением направления вектора внешнего магнитного поля, поворачиваясь осью легкого намагничивания вслед за этим вектором внешнего магнитного поля. Скорость следования образца за скоростью изменения внешнего магнитного поля зависит от намагниченности образца, от параметров внешней среды и условий закрепления образца в пространстве. Намагниченность образца при условии не закрепления образца не изменяется.

Чтобы добиться перемагничивания частиц в пульпе, где, как известно, ферромагнитные частицы свободно могут ориентироваться вдоль вектора внешнего магнитного поля, оно должно изменяться со скоростью, которая превышает скорость механического перемещения образца в этом поле. Угол запаздывания между углом поворота частицы и вектором магнитного поля должно быть более 90° . С тем, чтобы частицы успели двинуться вслед за магнитным полем, имеющим в тот момент однополярное направление. Определим, какова должна быть при этом частота изменения поля.

Предположим, что в потоке пульпы в качестве твердой фазы содержатся частицы ферросилиция, имеющие форму эллипсоидов вращения с большой осью a и малой осью b . Предположим также, что магнитное поле равномерное.

При попадании в магнитное поле каждая такая частица намагничивается и на ее концах образуются «магнитные массы». Эти массы взаимодействуя со внешним магнитным полем, вызывают вращение частицы относительно малой оси, т.е. ориентируются большой осью вдоль вектора внешнего магнитного поля, что приводит к изменению размагничивающего фактора отрезка пульпы и, как следствие к изменению магнитной восприимчивости этого отрезка пульпы. Это, так называемое, магнитное структурирование. До поступления в магнитное поле, частицы ориентированы длинной осью произвольно в пространстве и распределение углов ориентации равномерное. А после попадания в поле ориентация частиц у всех одинаковая.

Момент вращения, действующий на частицу, составляет [1]:

$$M_{MEX} = fa \sin \alpha_1, \quad (1)$$

где $f = mH$ – сила, действующая на концы частицы; α_1 – угол между большой осью частицы и вектором внешнего магнитного поля; m – магнитная масса.

Учитывая, что $m = \Phi$, т.е. магнитный поток, проходящий через сечение S частицы, получаем $f = \Phi H$. Известно также, что

$$\Phi = BH, \quad (2)$$

$$B = \mu_0 \bar{\mu} H, \quad (3)$$

где $\bar{\mu}$ – магнитная проницаемость частицы; $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6}$ Гн/м – абсолютная магнитная постоянная; B – магнитная индукция в области частицы.

Тогда:

$$M_{MEX} = \mu_0 \bar{\mu} S H^2 a \sin \alpha_1 = K_1 \sin \alpha_1. \quad (4)$$

Вращению частиц препятствует момент от силы противодействия, которая зависит от вязкости среды. Сила вязкости среды равна [2]:

$$F_\mu = \frac{18\mu U_\omega m_\omega}{a^2 \delta_\omega}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости среды; U_ω – линейная скорость вращения концов частицы; m_ω – масса частицы; δ_ω – плотность частицы.

Таким образом:

$$M_\mu = F_\mu a. \quad (6)$$

Линейная скорость концов частицы $U = \pi a \frac{d\alpha_1}{dt}$. Общее выражение для статического момента противодействия:

$$M_{\mu} = \frac{18\mu m_{\text{ч}}}{a^2 \delta_{\text{ч}}} \frac{d\alpha_1}{dt} = K \frac{d\alpha_1}{dt}. \quad (7)$$

Угол поворота частицы можно определить из равенства:

$$M_{\mu} = M_{\text{МЭХ}} + J_1 \frac{d\omega}{dt}, \quad (8)$$

где J_1 – момент инерции частицы.

С погрешностью, не превышающей 5 %, предположим, что $\sin \alpha_1 = \alpha_1$. Тогда уравнение динамического равновесия частицы составит:

$$J_1 \frac{d^2\alpha_1}{dt^2} - K \frac{d\alpha_1}{dt} + K_1\alpha_1 = 0. \quad (9)$$

Корни характеристического уравнения этого дифференциального уравнения составляют:

$$p_{1,2} = \frac{K \pm \sqrt{K^2 - 4J_1K_1}}{2J_1}, \quad (10)$$

а решение имеет вид:

$$\alpha_1(t) = \alpha_0 \left(\left(1 - \frac{p_1}{p_1 - p_2}\right) \exp(-p_1 t) + \frac{p_2}{p_1 - p_2} \exp(-p_2 t) \right). \quad (11)$$

Оценим численно, полученное решение при таких исходных данных:
 $a = 1\text{мм} = 10^{-3}\text{ м}$, $\delta_{\text{ч}} = 4000\text{кг} / \text{м}^3$, $\bar{\mu} = 2$, $H = 50000\text{А} / \text{м}$, $\mu = 10^{-3}\text{ Нс} / \text{м}^2$.

Момент инерции составит: $J_1 = 0.52 \times 10^{-12}$, коэффициенты: $K_1 = 5 \times 10^{-6}$, $K = 9.42 \times 10^{-9}$. Корни характеристического уравнения равны: $p_1 = 17.67 \times 10^3$, $p_2 = 0.59 \times 10^3$. Уравнение вращения частицы в числовом выражении:

$$\alpha_1(t) = \alpha_0(1 - 1.03\exp(-17.67 \times 10^3 t) - 0.03\exp(-0.59 \times 10^3 t)). \quad (12)$$

Время можно выразить через скорость потока пульпы на участке действия магнитного поля. Или же задаться условием, что угол поворота частиц не должен быть больше 5 – 10 % от начального значения. Тогда:

$$0.95 = (1 - 1.03\exp(-17.67 \times 10^3 t) - 0.03\exp(-0.59 \times 10^3 t)), \quad (13)$$

отсюда определим время воздействия магнитного поля одной полярности. Для чего ограничимся членом с наибольшим показателем и наибольшим коэффициентом, поскольку второй член уравнения вносит малую долю влияния на показатели движения частицы. Тогда:

$$\Delta t = \frac{\ln 0.95}{-17.07 \times 10^3} = 3 \times 10^{-6} \text{ с}. \quad (14)$$

Частота магнитного поля составит:

$$f = \frac{1}{\Delta t} = 0.33 \times 10^6 \text{ Гц} = 330 \text{ кГц}. \quad (15)$$

Время воздействия поля с частотой 50 Гц соответствует 0,01 с. В результате угол отставания ориентации частицы от вектора магнитного поля составляет:

$$\alpha_1(t) = \alpha_0(1 - 1.03\exp(-176,7) - 0.03\exp(-5,9)) = \alpha_0(1 - 0.00028) = 0,9997\alpha_0 \quad (16)$$

Выводы. Таким образом, воздействие на ферромагнитную пульпу переменным магнитным полем частотой 50 Гц не может вызвать размагничивания частиц ферромагнетика, поскольку эти частицы успевают ориентиро-

ваться осью легкого намагничивания вдоль вектора внешнего магнитного поля. Жесткого закрепления положения частицы в переменном магнитном поле не наблюдается. Некоторое улучшение реологических показателей ферромагнитной пульпы, прошедшей через размагничивающий аппарат можно объяснить механическим разрушением флоккул до размеров, которые определяются значением остаточной намагниченности феррочастиц.

Список литературы: 1. Кармазин В.В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых: в 2 т. / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. – М.: из-во Московского государственного горного университета, 2008. – Т. 1: Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. – 2005. – 768 с. 2. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых / В.Г. Деркач. – М.: Недра, 1966. – 338 с.

Поступила в редколлегию 27.08.12

УДК 622.781

Размагничивание ферромагнитных частиц в пульпе / И.К. МЛАДЕЦКИЙ, Э.М. ПАЙВА
// Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 107 – 113. – Библиогр.: 2 назв.

На базі вивчення механізму переміщення частки феромагнетика у в'язкому середовищі під дією зовнішнього магнітного поля, отримано закон її руху та визначена частота зміни зовнішнього магнітного поля, коли частка суттєво відстає по фазі від вектора зовнішнього магнітного поля, що обумовлює можливість її розмагничування у пульпі.

By considering a ferromagnetic particle mechanical motion in viscous medium under the action of external magnetic field we have discovered the particle motion law and have evaluated the frequency of external magnetic field fluctuations, when the particle is in lagging phase with vector of external magnetic field, when the possibility of particle demagnetization in pulp exists.

В.П. НАДУТЫЙ, д-р техн. наук, проф., ИГТМ НАНУ, Днепропетровск
А.И. ЕГУРНОВ, канд. техн. наук, президент, ООО «АННА-ТЕМС»,
Днепропетровск,
В.Ф. ЯГНЮКОВ, мл. науч. сотруд., ИГТМ НАНУ, Днепропетровск

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ И СОЗДАНИЮ ВИБРОГРОХОТА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТРУДНОГРОХОТИМОЙ ГОРНОЙ МАССЫ

В статье представлено схематическое решение конструкции валкового вибрационного грохота, результаты его промышленного испытания, основные зависимости производительности и эффективности от режимов и конструкционных параметров.

Классификация горной массы по крупности является одной из массовых операций при добыче, переработке и использовании добытого сырья. Для этих целей создано множество различных конструкций машин, в которых используются всевозможные принципы разделения. Несмотря на это многообразие, существует целый ряд проблем технологического и экспериментального порядка, которые снижают эффективность их использования. Это, прежде всего, значительная удельная металлоемкость и энергоемкость. При эксплуатации многих видов классифицирующего оборудования возникают трудности с эффективным разделением влажной и липкой горной массы и с ее обезвоживанием. Основную проблему составляет не отделение внешней влаги, а влаги, находящейся в поровых каналах слоя горной массы и в перетяжках между частицами.

В значительной степени эту проблему позволяет решить применение вибрационного грохочения, в которой процесс разделения частиц по крупности происходит при значительном амплитудно-частотном воздействии на грохотимый слой. Однако в процессах мелкой и тонкой классификации эффективность разделения и обезвоживания на плоских грохотах с различными видами сеток не удовлетворяют требованиям технологии.

Изучение мирового и отечественного опыта вибрационной классификации [1 – 5] показало, что одним из перспективных является метод класси-

кации на валковых грохотах. Особенно он эффективен при классификации липких, вязких и влажных материалов. Однако имеющиеся валковые грохоты, которые особенно популярны за рубежом [1 – 3], имеют сложную кинематику с индивидуальным приводом на каждую пару валков и т.д. [3]. Это значительно усложняет конструкцию, увеличивает ее вес и энергоемкость процесса.

Целью исследований авторов являлось создание конструкции валкового вибрационного грохота с передачей вращающих моментов на валке от вибровозбудителей за счет самосинхронизации. Это позволяет избежать конструктивных решений по трансмиссии, снизить металлоемкость и энергопотребление и легко управлять частотным режимом вращения валков.

Принципиальная схема предлагаемого валкового вибрационного грохота показана на рисунке.

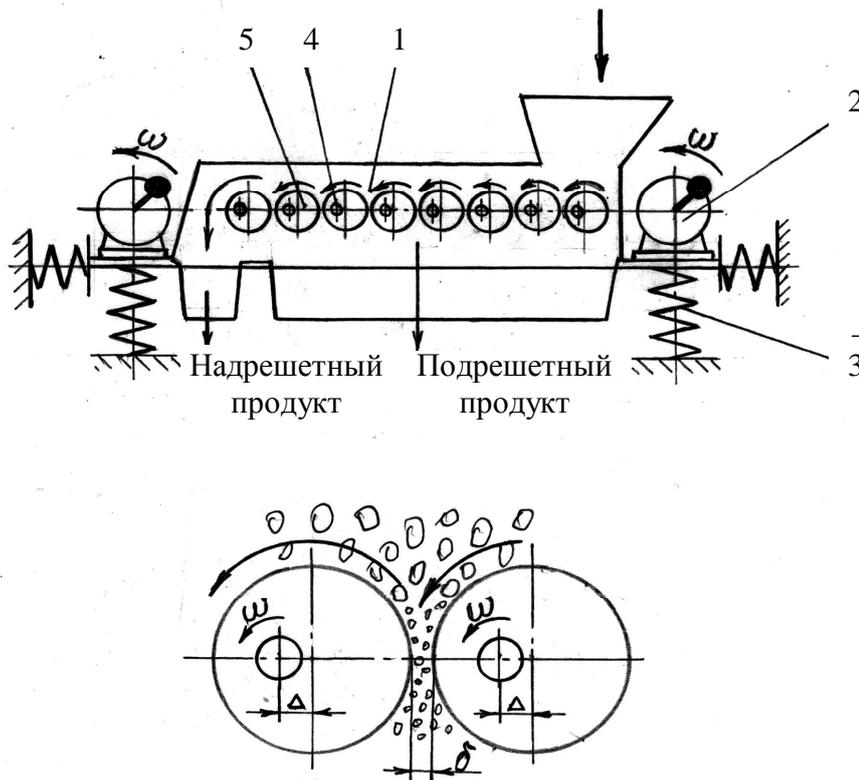


Рис. – Схема валкового вибрационного грохота: 1 – короб; 2 – инерционный вибровозбудитель; 3 – упругие связи; 4 – эксцентриситет валков; 5 – рабочие валки.

Он состоит из короба 1 в виде рамы, на которой находятся один или два инерционных вибровозбудителя 2. Рама относительно монтажной площадки установлена на упругом основании 3 (предпочтительно на резиновых или резинометаллических амортизаторах).

Установка рамы не требует специального бетонного фундамента или анкерного крепления упругих опор, поскольку колебательная система практически является динамически уравновешенной [6].

Просеивающая поверхность грохота выполнена в виде валков 4, расположенных параллельно друг другу с зазором δ , определяющим крупность разделения материала. По продольной оси грохота валки устанавливаются соосно с осями вибровозбудителей, а по поперечной оси – параллельно. При этом каждый валок 5 выполнен с эксцентриситетом Δ и представляет собой дебаланс. Все валки вращаются в одну сторону, определяемую вибровозбудителем, при работе которого за счет самосинхронизации возбуждаются вращения валков. Регулируются обороты привода с помощью частотного регулятора. Валки в раме установлены с регулируемым зазором, что позволяет адаптировать грохот к разным условиям эксплуатации и обеспечивать требуемую крупность и эффективность грохочения.

Грохот устанавливается горизонтально с положительным или отрицательным углом в сторону разгрузки и транспортирования. Диаметр валков подбирается в зависимости от крупности разделения и угла захвата. Вращение валков в одну сторону исключает заклинивание или забивание щели между ними, а наличие встречного потока разрыхляет липкий материал, препятствует окомкованию, разрушает поровые каналы во влажном слое грохотимого материала, что позволяет интенсивно обезвоживать надрешетный продукт грохочения [7]. Регулируемыми параметрами грохота являются частота вращения привода и валков ω , угол наклона грохота α , зазор между валками δ , диаметр валков D и их эксцентриситет Δ , влажность w и плотность γ грохотимой горной массы.

Выполнен комплекс исследований по влиянию каждого регулируемого параметра на производительность и эффективность грохочения [7].

Графический анализ экспериментальных результатов позволил методом наименьших квадратов идентифицировать их в виде адекватных моделей от каждого отдельного фактора, а в конечном итоге получить многофакторные модели зависимостей удельной производительности и эффективности работы вибро-грохота [8].

Так, для удельной производительности обобщенная модель имеет вид:

$$Q = -50,09 - 0,055\omega - 0,461w + 3,73\delta + 158,13\gamma - 1,184D + 0,0306\alpha^2 - 43,12\gamma^2 + 1,24\Delta^2 - 0,394\alpha\delta - 0,0095\omega\gamma - 0,008\omega\Delta - 0,00049\omega w. \quad (1)$$

Из полученной модели следует, что от параметров γ , ω , w , δ и D производительность грохота зависит линейно, от параметров α и Δ – квадратично, от параметра γ – параболически. Кроме того, наблюдается взаимодействие параметров ω с параметрами γ , w и Δ , а также параметрами α и δ .

Для эффективности грохочения обобщенная модель зависимости от всех варьируемых параметров имеет вид:

$$E = 34,57 - 5,42d + 9,12\Delta - 0,04\omega - 0,55\alpha + \\ + 26,2Q + 1,35d^2 - 2,33\Delta^2 - 0,1w^2 + 0,028\alpha^2 - 5,1Q^2 \quad (2)$$

Разработанные обобщенные модели позволяют определять рациональные или оптимальные параметры валкового грохота, анализировать процесс классификации, а в процессе проектирования машины – обосновывать ее параметры в соответствии с техническим заданием.

Выполненный комплекс исследований [9] на экспериментальных образцах валковых классификаторов показал их высокие технологические качества при разделении влажных и липких материалов (влажный уголь, влажный известняк, глинистая горная масса). Эффективность грохочения составляла 90 ÷ 95 %. При этом рабочая поверхность грохотов была в пределах: длина – 2000 ÷ 2500 м, ширина – 1000 м, суммарная мощность двух вибровозбудителей составляла 3,0 кВт, при этом производительность в зависимости от плотности материала – 80 ÷ 100 т/ч. Вес грохота составил 750 кг.

Таким образом, конструкции валковых грохотов, выполненные на уровне изобретений [10 – 12], показали высокую работоспособность, низкие металло- и энергоемкость, требуемые технологические показатели и рекомендованы к широкому промышленному использованию.

Список литературы: 1. *Güter Hakc Andreas* Использование роликовых грохотов и ротационных сепараторов для разделения сложных при грохочении материалов / *Güter Hakc Andreas, Miller Thomas* // *Aufbereit Techn.* – 2000. – № 7. – С. 330 – 335. 2. *Mobilbrecker mit Rollenrost Schweiz Baust* // *Industry.* – 2001. – № 2. – С. 16 – 17. 3. *Zemag-Walzenrostsibe mit Einzelantrieb und Online-Stenerungsisten* // *Aufbereit Techn.* – 1999. – № 7. – С. 352 – 353. 4. *Самсонов Л.Н.* Исследование работоспособности валкового сепаратора при переработке влажного торфа / [Л.Н. Самсонов, Ю.Н. Павлов, С.М. Качканян и др.] // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2001. – № 1. – С. 229 – 231. 5. *Попов Г.А.* О возможности интенсификации процесса сортировки горной массы с применением валковых грохотов / *Г.А. Попов, В.А. Настоящий* // *Техника и технология горного производства.* – 1990. – С. 86 – 88. 6. *Высокопроизводительное средство классификации минерального сырья* // *Эффективность реализации научного, ресурсного и промыш-*

ленного потенциала в современных условиях: IV Пром. конф с междунар. участием: тезисы докл. – Славское, 2004. – С. 110 – 112. **7.** *Надутый В.П.* Комплексный метод выбора параметров валковых вибрационных классификаторов / *В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков* // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: V Пром. конф с междунар. участием: тезисы докл. – Славское, 2005. – С. 113 – 115. **8.** *Надутый В.П.* Определение взаимного влияния комплекса параметров валковых вибрационных классификаторов / *В.П. Надутый, В.А. Остапенко, В.Ф. Ягнюков* // Вібрації в техніці та технологіях. – 2006. – Вип. 4 (42). – С. 95 – 101. **9.** *Надутый В.П.* Результаты промышленной апробации валкового вибрационного грохота / *В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков* // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – Вип. 1 (65). – С. 73 – 75. **10.** Пат. № 47329, Украина, МКИ 07 В 1/100. Валковый классификатор / *Надутый В.П., Ягнюков В.Ф.* – Заявл. 10.08.09, опубл. 25.01.10, Бюл. № 2. **11.** Пат. № 71721 А, Україна, МКИ 07 В 1/14. Валковий класифікатор / *Надутый В.П., Ягнюков В.Ф.* – Заявл. 29.09.03, опубл. 15.12.04, Бюл. № 12. **12.** Пат. на винахід № 50098 А, Україна, МКИ 07 В 1/40. Грохот / *Надутый В.П., Взоров А.А., Ягнюков В.Ф.* – Заявл. 18.10.01, опубл. 16.09.02, Бюл. № 9.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 622.74:621.928.235

Результаты исследований по обоснованию параметров и созданию виброгрохота новой конструкции для классификации трудногрохотимой горной массы / В.П. НАДУТЫЙ, А.И. ЕГУРНОВ, В.Ф. ЯГНЮКОВ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 114 – 118. – Библиогр.: 12 назв.

У статті представлено схемне рішення нової конструкції валкового вібраційного грохоту, результати його промислових випробувань та основні залежності продуктивності й ефективності від режимних і конструктивних параметрів.

In article the circuit decision of a new design of a rollers vibrating screen, results of its industrial tests and basic dependences of productivity and effectiveness from regime and design of parameters is accounted.

Ю.В. НАУМЕНКО, д-р техн. наук, проф., НУВГП, Рівне

ЕКСТРЕМАЛЬНІ ШВИДКІСНІ ДИНАМІЧНІ СТАНИ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА

Зареєстровано ефект виникнення подвійного максимуму безрозмірних комплексних критеріїв сдвигового шару внутрішньо камерної завантаження барабанної млини. Показано, що виникнення тихохідного локального максимуму критеріїв обумовлено лавиноподібним руйнуванням контактів між частинками і зрідженому зернистої середовища. Запропоновано використовувати такий режим роботи для підвищення енергетичної ефективності тонкого подрібнення

Барабанні млини мають низьку енергетичну ефективність. Згідно гіпотези двофазного режиму руху внутрішньомлинного завантаження оптимальною щодо продуктивності вважається відносна швидкість обертання $\psi_{\omega} = 0,75$.

Натомість реальним режимом руху завантаження є трифазний [1, 2] при виникненні зсувного шару, де переважно здійснюється тонке подрібнення.

Селективність помелу полягає у здійсненні грубого подрібнення при підвищеній швидкості обертання та тонкого – при зниженій [3, 4].

У [5] описано явище отримання максимальної питомої ефективності подрібнення при зниженій швидкості обертання $\psi_{\omega} = 0,5$, а у [6, 7] – при зменшенні її до $\psi_{\omega} = 0,58$. Однак рекомендації щодо вибору швидкості є неоднозначними.

Метою роботи є визначення раціональних режимів руху завантаження для підвищення енергетичної ефективності багатостадійного помелу.

Процес подрібнення в барабанних млинах носить яскраво виражений випадковий характер. Описати його можна лише за допомогою узагальнених динамічних параметрів, що визначаються поведінкою завантаження.

Рух зсувного шару завантаження характеризується такими безрозмірними питомими динамічними критеріями.

Форсування зсувної швидкості K_{ϕ_3} – відношення середнього значення швидкості у вибраному перерізі шару до швидкості циліндричної поверхні камери при критичній швидкості обертання.

Гradient зсувної швидкості K_2 – відношення швидкості зсування у перерізі до критичної швидкості.

Питома енергія поступального руху шару E_3 – відношення квадрата середньої швидкості у перерізі до квадрата лінійної швидкості камери при критичній швидкості.

Температура середовища шару T – відношення квадрату швидкості зсування у перерізі до квадрата критичної швидкості. Це питома кінетична енергія, що відповідає випадковому хаотичному руху елементів. Динамічність активації K_∂ – відношення уявного сумарного вертикального прискорення, обумовленого зростанням кінетичної енергії при невеликому падінні, у перерізі до гравітаційного прискорення.

Розрахунок параметрів полягав у візуальному аналізі зареєстрованих картин руху завантаження (рис. 1). Задавались: радіус камери R , кутова швидкість ω та кут внутрішнього тертя завантаження φ . Вибиралось положення перерізу шару з основою в точці O_3 . Вимірювались радіальна координата основи R_3 , висота h_3 та кут нахилу α_3 перерізу. Обчислювались значення середньої зсувної швидкості перерізу V_{3c} , швидкість опорної поверхні в перерізі V_{30} та максимальна зсувна швидкість на його вільній поверхні V_{3max} за виразами:

$$V_{3c} = \omega(R^2 - R_3^2)/(2h_3), \quad (1)$$

$$V_{30} = \omega R_3, \quad (2)$$

$$V_{3max} = \sqrt{2Wh_3 \sin \alpha_3 \cos \varphi / (1 - \sin \varphi) - V_{30}^2}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad W &= \sqrt[3]{-L/2 + \sqrt{f}} + \sqrt[3]{-L/2 - \sqrt{f}} - q/3, & c &= (1 - \sin \varphi)/(3h_3 \sin \alpha_3 \cos \varphi), \\ f &= \left(-q^2/9 + m/3\right)^3 + (L/2)^2, & m &= \left(2V_{3c}|V_{30}^3|/c + 3dV_{30}^4\right)/d^3, \\ q &= -\left(V_{3c}^2/c^2 + 3d^2V_{30}^2\right)/d^3, & L &= 2(q/3)^3 - qm/3 - 2V_{30}^6/d^3, \\ d &= 2h_3 \sin \alpha_3 \cos \varphi / (1 - \sin \varphi). \end{aligned}$$

Обчислювались параметри за виразами:

$$K_{\varphi 3} = V_{3c} / \sqrt{Rg}, \quad (4)$$

$$E_3 = K_{\varphi 3}^2, \quad (5)$$

$$K_2 = (V_{\text{зmax}} + |V_{30}|) \sqrt{R/g} / h_3, \quad (6)$$

$$T = K_2^2, \quad (7)$$

$$K_0 = W/g. \quad (8)$$

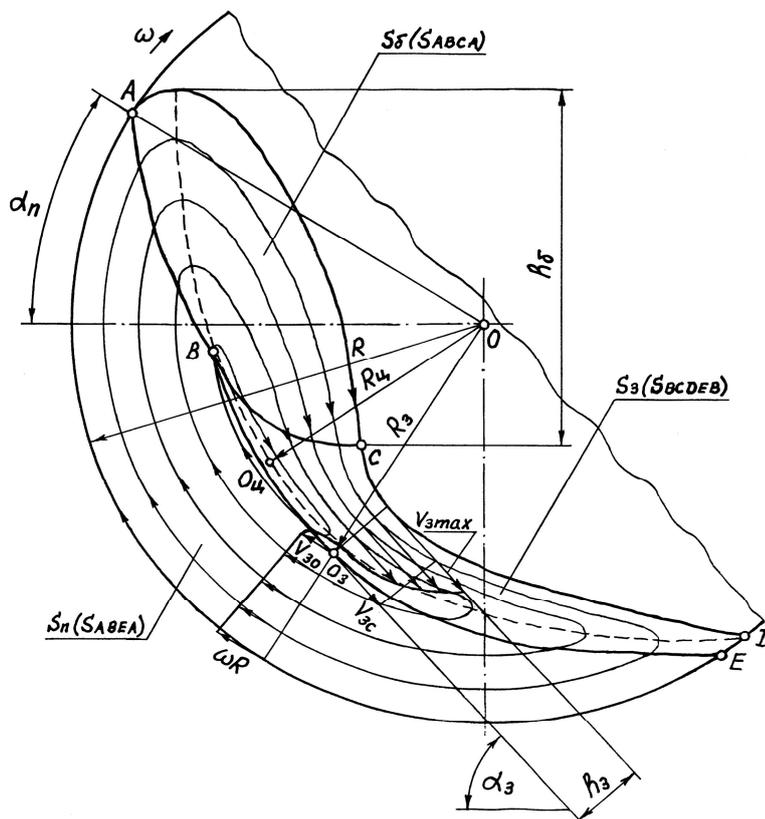


Рис. 1 – Розрахункова схема визначення критеріїв ефективності подрібнення за допомогою візуалізації картини руху завантаження

На основі аналізу масиву отриманих усереднених картини руху було розраховано залежності параметрів від швидкості обертання для окремих ступенів заповнення камери k .

На рис. 2 наведено одержані залежності за умови дрібного молольного завантаження, із розміром елементів d у камері діаметром D – $d/D < 0,005 - 0,01$, та гладкої поверхні камери. Графіки ілюструють зареєстрований ефект виникнення подвійного максимуму значень параметрів K_{ϕ_3} , E_3 , K_2 , T та K_0 при різних швидкостях.

Тихохідний локальний максимум реалізується при $\psi_\omega = 0,15 - 0,45$, швидкохідний абсолютний максимум – при $\psi_\omega = 0,85 - 1,03$, а середньоходовий мінімум – при $\psi_\omega = 0,51 - 0,63$.

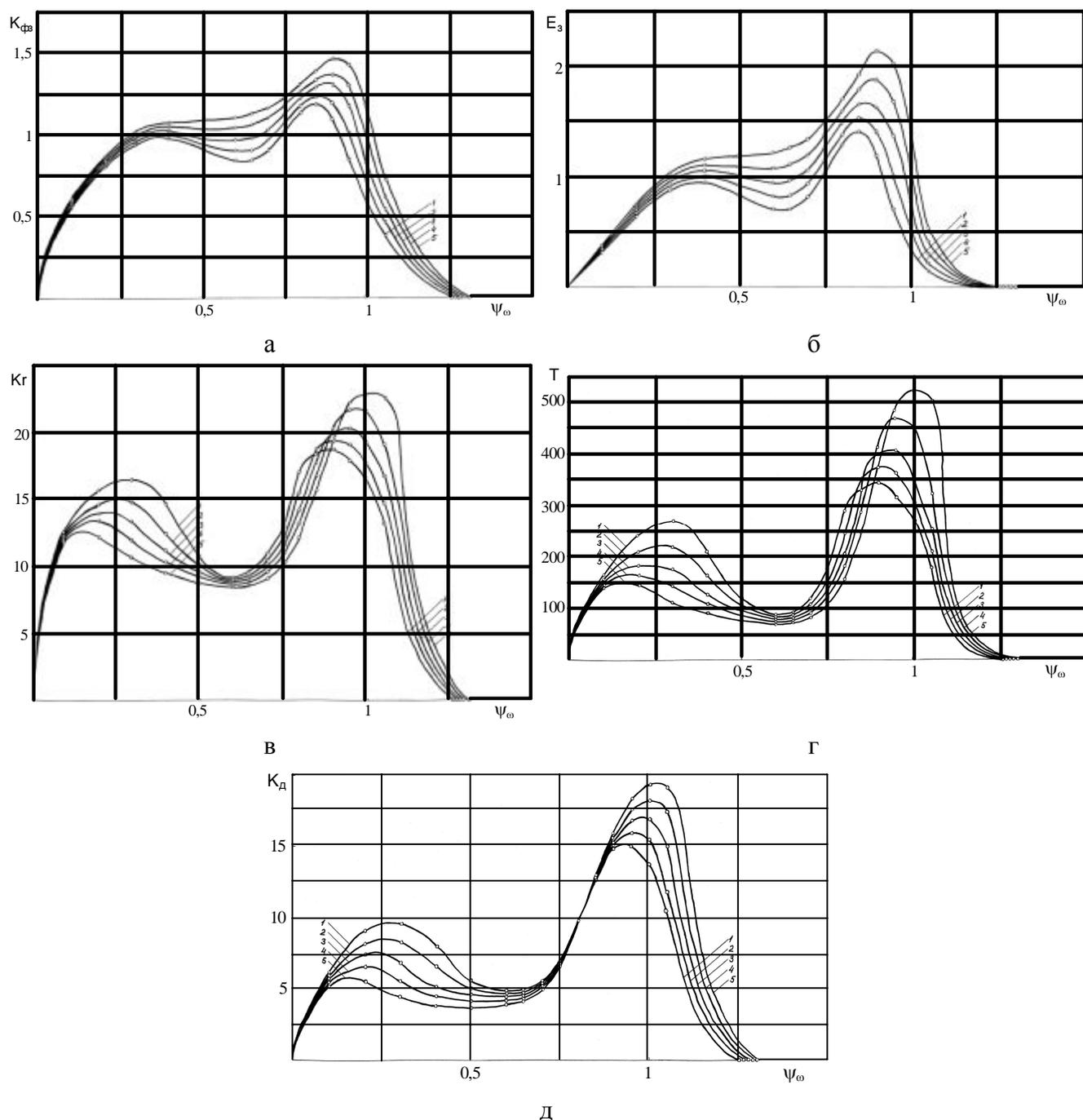


Рис. 2 – Залежності $K_{\phi з}$ (а), $E_з$ (б), $K_г$ (в), T (г), та $K_д$ (д) від ψ_ω при $d/D=0,0024$ та гладкій камері: 1 – $\kappa = 0,25$; 2 – $\kappa = 0,3$; 3 – $\kappa = 0,35$; 4 – $\kappa = 0,4$; 5 – $\kappa = 0,45$.

Виникнення тихохідного максимуму спричинено ефектом аномального зниження псевдов'язкості завантаження [8, 9]. Таке явище кваліфікується як надтекучість зернистого матеріалу. При цьому невелика висота зсувного шару зумовлює підвищені значення динамічних параметрів. Крім того, незначна за масою зона невірного падіння не здатна суттєво завадити розвитку та прискоренню зсувного потоку. Натомість виникнення середньоходового мінімуму параметрів спричинено значним збільшенням висоти зсувного шару

та зростанням маси зони невідного падіння, що здійснює гальмівний вплив на потік. Зі зростанням швидкості обертання зменшується товщина шару, підвищується висота падіння в зоні невідного падіння та кінетична енергія потоку, що компенсує гальмівний вплив цієї зони і сприяє прискоренню зсувного потоку та виникненню швидкохідного абсолютного максимуму параметрів, який спадає до нуля із утворенням пристінкового шару завантаження.

На рис. 3 зображено графіки залежностей опору середовища завантаження σ_{on} та його компонентів σ_{on1} та σ_{on2} від основної складової швидкості руху шару V_x . Перша складова характеризує сили тертя спокою, що виникають у момент початку руху середовища. Внаслідок реалізації ефекту дискретності зернистого матеріалу, такі сили опору різко зростають до максимального значення в момент початку руху і різко спадають, прямуючи до нуля, зі зростанням швидкості. Друга складова характеризує сили тертя ковзання при русі середовища, що описуються кулонівським законом сухого тертя.

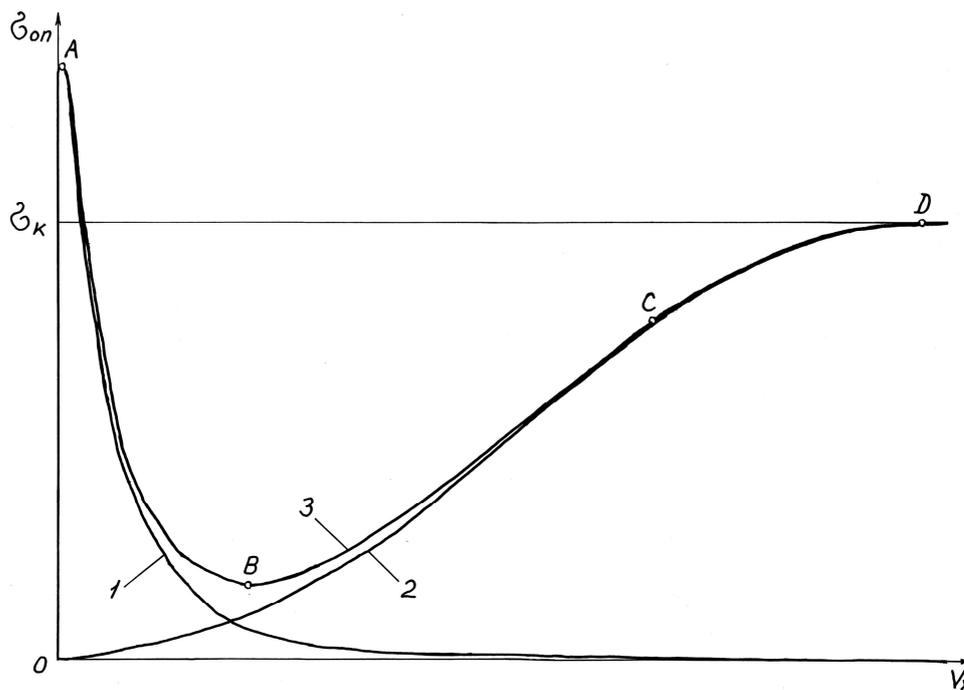


Рис. 3 – Графік залежності опору середовища від швидкості шару вздовж осі x :
 1 – $\sigma_{on1}(V_x)$, 2 – $\sigma_{on2}(V_x)$, 3 – $\sigma_{on}(V_x)$

На графіку $\sigma_{on}(V_x)$ точками O , A , B , C і D показані характерні щодо прояву реологічних властивостей середовища ділянки. Точка O позначає стан спокою шару і відповідає стану граничної рівноваги середовища у пластичній постановці задачі. Ділянка OA відповідає раптовому імпульсному зрос-

танню опору при зрушуванні потоку. На цій ділянці реалізується ефект повзучості, коли під дією сталого навантаження виникає дуже в'язка течія середовища з дуже низькими швидкостями. Ділянка AB відповідає області аномальної в'язкості середовища. В цій області внаслідок інтенсивних структурних змін у зернистому матеріалі відбувається лавиноподібне руйнування міжчастинкових контактів та зрідження середовища. В точці B значення напруження опору набуває мінімуму і формується течія, що розплескується [10, 11]. Якщо реологічна поведінка середовища на ділянці OB визначається переважно першою складовою σ_{on1} та силами тертя спокою, то на ділянці BD – переважно другою σ_{on2} та силами тертя ковзання при русі. На ділянці BC , при збільшенні швидкості, опір зростає практично за лінійною залежністю. Тут зернистий матеріал веде себе як лінійно в'язке середовище. Ділянка CD відповідає області кулонова тертя, оскільки напруження опору майже не залежить від швидкості та пропорційно стискаючій силі. Ефект виникнення аномальної в'язкості та мінімального опору поблизу точки B залежності $\sigma_{on}(V_x)$ було експериментально підтверджено при реєструванні явища лавиноподібного гравітаційного руху зернистого матеріалу по похилій поверхні [12 – 14].

Таким чином, зареєстровано ефект виникнення подвійного максимуму значень питомих динамічних параметрів зсувного шару для різних швидкостей обертання при малому відносному розмірі елементів молоткового завантаження барабанних млинів. Виникнення тихохідного локального максимуму параметрів, що підвищує ефективність останньої стадії тонкого подрібнення стиранням та роздавлюванням, зумовлено явищем аномально низької в'язкості зернистого середовища зсувного шару завантаження, коли рух потоку набуває лавиноподібного характеру.

Список літератури: 1. *Науменко Ю.В.* Основи теорії режимів роботи барабанних млинів: Монографія / *Ю.В. Науменко.* – Рівне: Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с. 2. *Науменко Ю.В.* Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення / *Ю.В. Науменко.* – Рівне : Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 88 с. 3. *Півняк Г.Г.* Ресурсозбереження та інтенсифікація процесів подрібнення / *Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко.* – Дніпропетровськ: НГАУ, 2001. – 163 с. 4. *Півняк Г.Г.* Подрібнювання. Енергетика і технологія / [*Г.Г. Півняк, Л.А. Вайсберг, В.І. Кириченко, В.В. Кириченко.*] – Дніпропетровськ: НГУ, 2006. – 314 с. 5. *Крюков Д.К.* Футеровки шарових мельниц / *Д.К. Крюков.* – М.: Машиностроение, 1965. – 184 с. 6. *Ковалюх В.Р.* Зависимость производительности цементной мельницы от коэффициента заполнения и частоты вращения / *В.Р. Ковалюх, М.Б. Гуз* // Цемент. – 1978. – № 7. – С. 8 – 9. 7. *Ковалюх В.Р.* Оптимизация процесса измельчения в шаровых мельницах с регулируемым электроприводом / *В.Р. Ковалюх* // Цемент. – 1985. – № 8. – С. 19 – 22. 8. *Ден-Гартог Дж.П.* Механические колебания / *Дж.П. Ден-Гартог*; [пер. с англ.]. – М.: Физматгиз, 1960. – 580 с. 9. *Ротенберг А.В.* О воз-

124 *ISSN 2079-0821. Вісник НТУ «ХПІ». 2012. № 48 (954)*

можном виде тензора вязких напряжений в механике сыпучих тел / *А.В. Ротенберг* // Исследовано в России. – 2001. – Вып. 42. – С. 465 – 475: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/042.pdf/>. **10.** Долгунин В.Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение / *В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев*. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2005. – 112 с. **11.** Долгунин В.Н. Сегрегация в зернистых средах: явление и его технологическое применение / *В.Н. Долгунин, А.А. Уколов*. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 180 с. **12.** Borzsonyi T. Two scenarios for avalanche dynamics in inclined granular layers / *T. Borzsonyi, T.C. Hasley, R.E. Ecke* // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94, № 208001. – P. 208001. **13.** Borzsonyi T. Avalanche dynamics on a rough inclined plane / *T. Borzsonyi, T.C. Hasley, R.E. Ecke* // Physical Review E. – 2008. – Vol. 78. – P. 011306 (15 pages). **14.** Armanini A. Liquid-granular channel flow dynamics / *A. Armanini, L. Fraccarollo, M. Larcher* // Powder Technology. – 2008. – Vol. 182. – P. 218 – 227.

Надійшла до редколегії 20.08.12

УДК 621.926.5:539.215

Екстремальні швидкісні динамічні стани внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / Ю.В. НАУМЕНКО // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 119 – 125. – Библиогр.: 14 назв.

Зарегистрировано эффект возникновения двойного максимума безразмерных комплексных критериев сдвигового слоя внутрикамерной загрузки барабанной мельницы. Показано, что возникновение тихходного локального максимума критериев обусловлено лавинообразным разрушением контактов между частицами и ожижением зернистой среды. Предложено использовать такой режим работы для повышения энергетической эффективности тонкого измельчения.

The effect of tumbling mills intrachamber filling shifting layer integral dimensionless criterions double maximum was established. The initiation of slow local criterions maximum was demonstrated to determine by avalanche elements contacts collapse and granular medium fluidization. The use of these operating conditions was put forward for raising the fine milling energy efficiency.

Н.И. СОКУР, д-р техн. наук, проф., **Л.М. СОКУР**, ст. препод.,
И.Н. СОКУР, науч. сотруд., КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДРОБИЛКИ ЦД-50 В ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В статье приводится описание разработанной авторами новой конструкции центробежной дробилки ЦД-50 и результаты ее испытаний в полупромышленных условиях. Делаются выводы о целесообразности ее приложения для дробления руд и строительных материалов.

Центробежная дробилка ЦД-50, разработанная при участии авторов и изготовлена в механическом цехе института «Механобрчермет» (рис. 1, табл. 1).

Во время работы дробилки исходный материал, подлежащий дроблению, равномерно подается через загрузочную точку 1 и втулку на крышке 2 на центральную точку 3 ротора 5.

Попадая на конус 4, материал равномерно распределяется на разгонном диске ротора.

Перемещаясь на диске по спиральной траектории, куски материала достигают внутренней кромки двух разгонных ребер 6, материал разгоняется и приобретает скорость 90 – 130 м/с, выбрасывается ими в зону дробления и разрушается при ударе о футеровочные плиты 7. Угол встречи материала с рабочей поверхностью плиты составляет 75 – 90°.

Из бункера 9 дробленый материал разгружается через точку 11.

Вращение ротору 5 передается от электродвигателя 20 через клиноременную передачу 21, карданный вал 22, гидромуфту 12, смонтированных на специальной раме 13, второй карданный вал 10, подпятник 8.

Ротор 5, посредством опорной платформы 17 через демпфирующие элементы 16 опирается на опорный узел 18 корпуса дробилки 19.

Верхняя часть корпуса дробилки закрыта крышкой 15, снабженную люками 14, обеспечивающих свободный доступ к ротору.

Подача смазки в гидропривод осуществляется через систему смазки гидропривода 12. Гидропривод с системой смазки технологическими трубопроводами связан со станцией циркуляционной жидкой смазки ЧД-70 м.

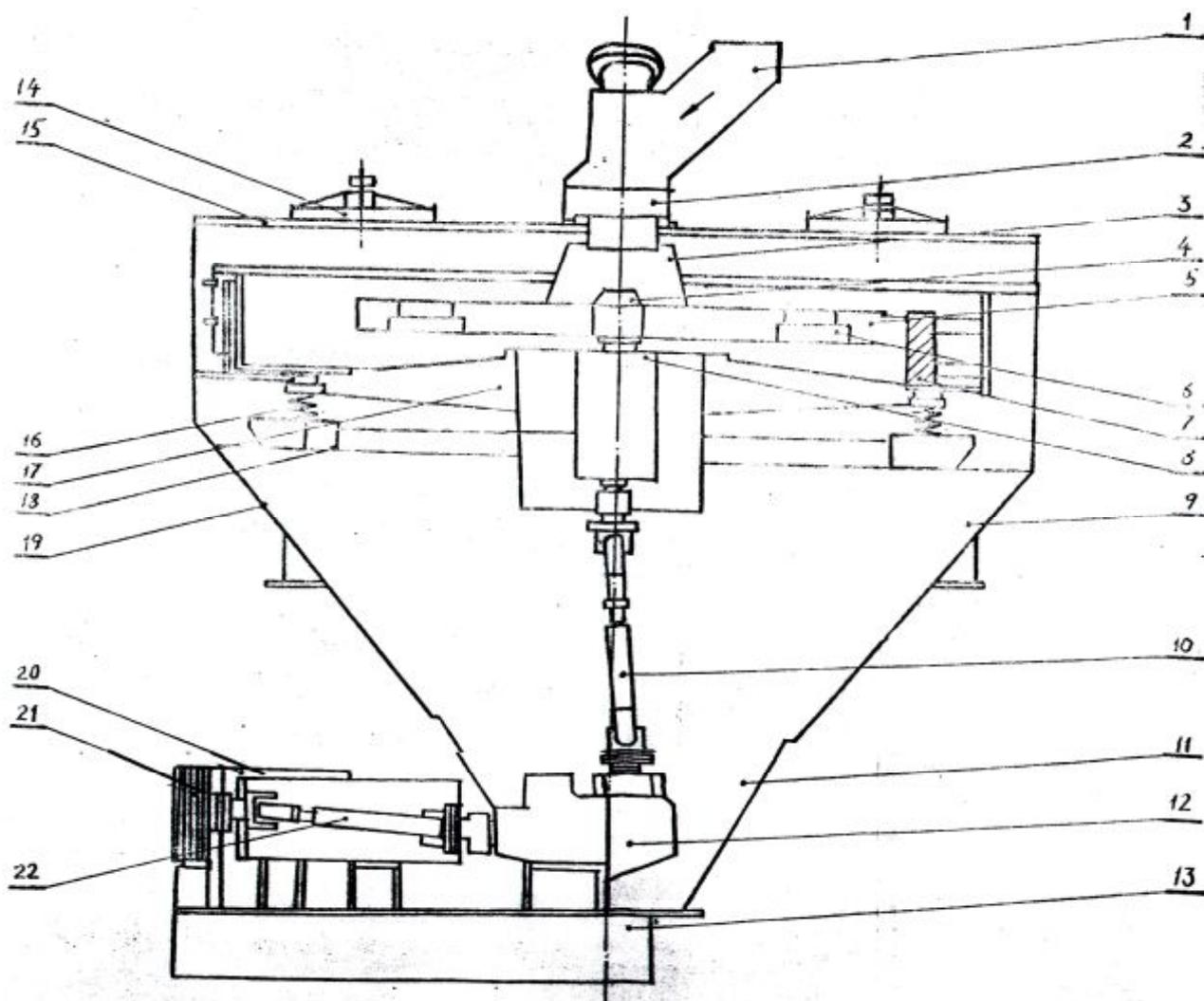


Рис. 1 – Схема центробежной дробилки ЦД-50

Частота вращения выходного вала муфты и соединенного с ним ротора регулируется в интервале $1,67 \div 16,7 \text{ с}^{-1}$ ($100 - 1000 \text{ мин}^{-1}$), что позволяет производить плавный запуск дробилки и устанавливать оптимальный режим работы рабочего органа – ротора.

В приводе дробилки применен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Таблица 1

Техническая характеристика дробилки ЦД-50

	Наименование измерения	Единица	Величина
1	Производительность	$\text{м}^3/\text{ч}$	25
2	Крупность исходного материала	мм	100 – 0
3	Крупность дробленого материала	мм	10 – 0
4	Диаметр вылета разгонных ребер ротора	мм	2200

Экспериментальный образец центробежной дробилки был доставлен с механического завода института укрупненными узлами и смонтирован в дробильном отделении опытной обогатительной фабрики института Механо-брчермет (ОПИ).

Технологическая цепочка включала в себя бункер исходной руды, пластинчатый питатель, наклонный ленточный конвейер, промежуточный бункер, ленточный питатель, загрузочную течку (рис. 2).

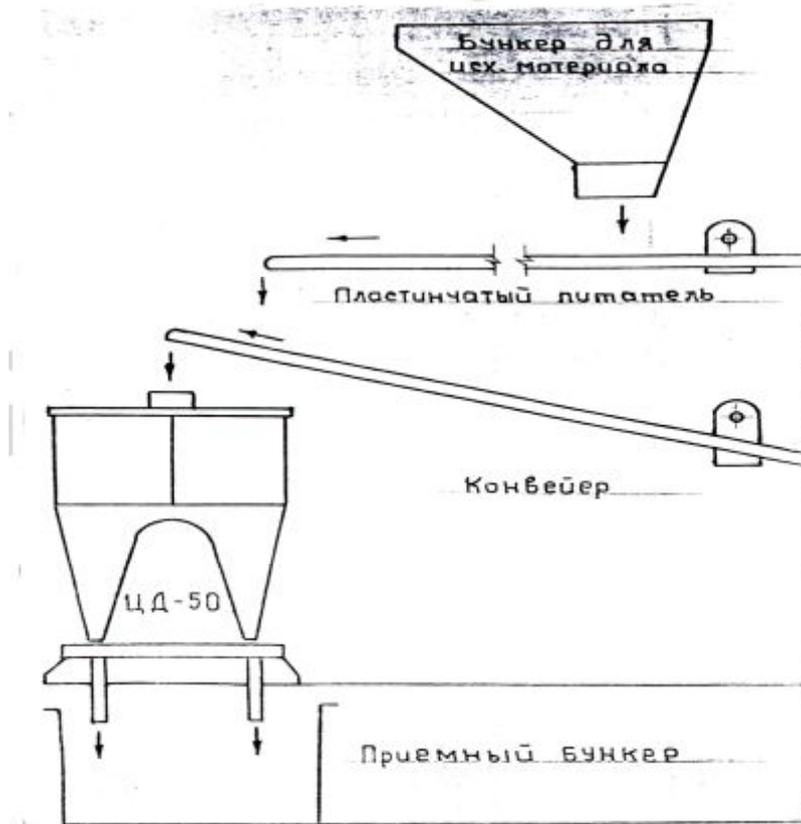


Рис. 2 – Схема расположения центробежной дробилки ЦД-50 на опытном производстве

Исходная руда подавалась из накапливающего бункера с помощью грейферного погрузчика в бункер исходной руды.

Дробленый продукт через разгрузочные течки дробилки разгружался в два бункера, расположенные диаметрально противоположно от дробилки.

При испытаниях производительность дробилки лимитировалось максимально возможной производительностью ленточного питателя 30 – 35 т/ч.

В процессе испытаний частота вращения ротора изменялась в пределах от 200 до 1200 мин⁻¹ (соответственно скорость вылета частиц от 23,0 до 138,0 м/с).

Установлено, что потребляемая приводом мощность с увеличением частоты вращения ротора в указанных пределах увеличивается от 26 до 185 кВт при нагрузке 30 т/ч, а на холостом ходу от 10,0 до 40,0 кВт. Удельный расход электроэнергии без учета степени дробления изменяется от 0,8 до 6,0 кВтч/т исходного питания.

Средневзвешенная крупность при этом уменьшается с 13,0 до 2,3 мм, а степень дробления возрастает от 4 до 24,0, причем, имеется тенденция к снижению кратности дробления при повышении производительности (рис. 3). Как следует из анализа результатов испытаний, максимальный прирост класса минус 5,0 мм составил 85,6 %, класса минус 10,0 мм составил 85,8 % при максимальной частоте вращения ротора 1200 мин^{-1} и производительности 30,0 т/ч.

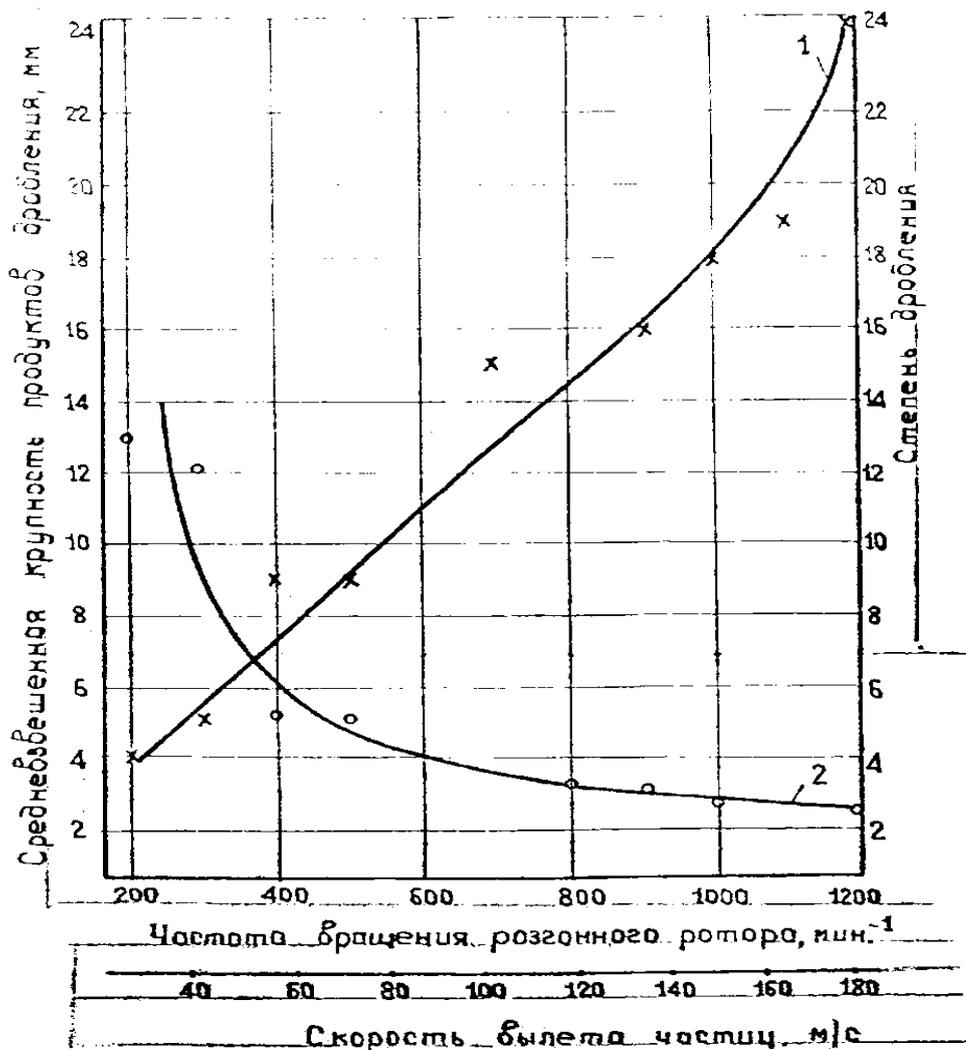


Рис. 3 – Зависимость технологических показателей дробления от частоты вращения разгонного ротора: 1 – степень дробления, 2 – средневзвешенная крупность продуктов дробления.

Массовая доля классов минус 1,0 мм минус 5,0 мм и минус 10,0 мм в дробленом продукте составила при этом 42,0 %, 92,9 % и 97,9 % соответственно.

При работе в проектном режиме (Π 1000 мин^{-1}) массовая доля классов минус 5,0 мм и 10,0 мм составила соответственно 85 % и 95 % (рис. 4).

Средневзвешенная крупность продукта в опытах составила 13 – 2,0 мм (при изменении n от 200 до 1200 мин^{-1}).

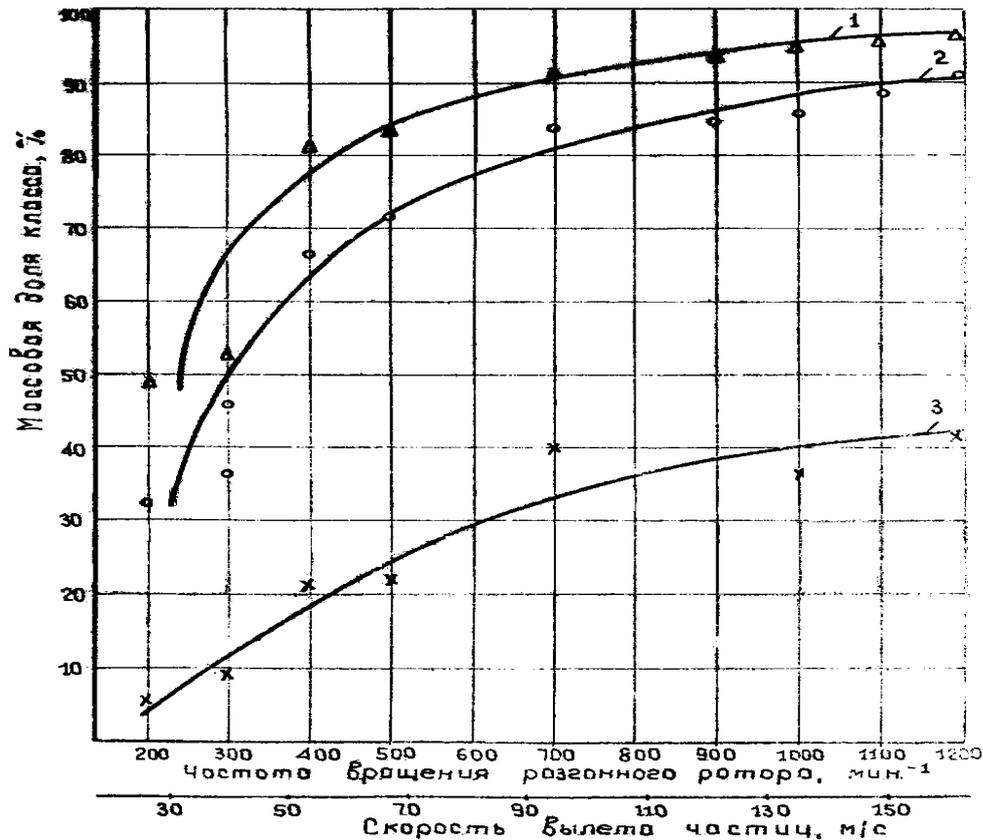


Рис. 4 – Зависимость крупности дробления от частоты вращения разгонного ротора: 1 – массовая доля класса минус 10,0 мм, 2 – массовая доля класса минус 5,0 мм, 3 – массовая доля класса минус 1,0 мм

Таким образом, при увеличении частоты вращения разгонного ротора увеличивается выход классов – 5,0 – 10, мм, степень дробления материала и уменьшается средневзвешенная крупность дробленого продукта.

Полученные в процессе испытаний технологические показатели работы дробилки ЦД-50 удовлетворяют требованиям отрасли по дроблению магнетитовых руд, поэтому созданная конструкция дробилки представляется перспективной, и она была рекомендована для проведения испытаний в промышленных условиях действующей дробильной фабрики Северного ГОКа.

Выводы.

1. Испытания центробежной дробилки ЦД-50 на опытном производстве института Механобрчермет на измельчении железистых кварцитов месторождения ЮГОКа подтвердили ее работоспособность и возможность получения запланированных технологических показателей.

2. При дроблении железистых кварцитов крупностью 100 – 0 мм установлено: производительность дробилки по исходному питанию составила 50 т/ч и обусловлена технологическими параметрами питающего конвейера; при проектной частоте вращения разгонного ротора $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ массовая доля классов минус 10 мм и минус 5 мм в дробленом продукте составляет 95 % и 85 % соответственно, степень дробления составила 15 – 18; удельный расход электроэнергии по исходной руде без учета степени дробления составляет 4,3 кВтч/т; полученные технологические показатели удовлетворяют требованиям промышленности.

3. Установлено, что технологические показатели работы центробежной дробилки зависят от частоты вращения ротора, при этом с увеличением частоты вращения массовая доля готовых классов, степень дробления и удельный расход электроэнергии увеличиваются.

Список литературы: 1. Сокур Н.И. Дробление и измельчение руд / Н.И. Сокур, В.Н. Потураев, Е.К. Бабец. – Кривой Рог: «ВЭЖА», 2000. – 290 с. 2. Сокур Н.И. Центробежные дробилки / Н.И. Сокур, И.Н. Сокур, Л.М. Сокур. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2009. – 204 с.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 622.27:6292.9

Испытания центробежной дробилки ЦД-50 в полупромышленных условиях / Н.И. СОКУР, Л.М. СОКУР, И.Н. СОКУР // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 126 – 131. – Библиогр.: 2 назв.

В статті приводиться опис розробленої авторами нової конструкції відцентрової дробарки ЦД-50 і результати її випробувань у напівпромислових умовах. Робляться висновки про доцільність її застосування для дроблення руд і будівельних матеріалів.

In the article description over of the new construction of centrifugal crusher of CD-50 and results of its tests developed authors is brought in semiindustrial terms. Drawn conclusion about expedience of its application for crushing of ores and build materials.

Е.В. ШТЕФАН, д-р техн. наук, проф., НУХТ, Київ,

С.І. БЛАЖЕНКО, канд. техн. наук, доц., НУХТ, Київ

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ОРГАНІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Розглянуто проблему визначення модуля пружності та коефіцієнту Пуасона дисперсних матеріалів типу лузги соняшника, соломи, жому, пивної дробини, деревинної стружки і подібних матеріалів. Представлено методику експериментального визначення модуля пружності коефіцієнта Пуасона дисперсних систем.

Постановка проблеми дослідження обумовлена необхідністю проектування ефективного технологічного обладнання для виробництва твердого біопалива. Використання методів математичного моделювання у якості інструментального ядра у сучасних технологіях проектування процесів та обладнання по обробленню дисперсних матеріалів (ДМ) неможливо без врахування структурно-механічних особливостей цих матеріалів і, в першу чергу, таких їх реологічних властивостей твердої фази, як пружність, пластичність, в'язкість та ін. Значною проблемою при отриманні адекватних результатів чисельного моделювання процесів пресування при виробництві твердого біопалива є відсутність в довідковій літературі реологічних характеристик відповідних видів дисперсних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій по даній проблемі свідчить, що на сьогоднішній день розроблено математичні моделі оброблення ДМ в галузі механіки ґрунтів, порошкової металургії та харчової промисловості [1 – 3]. Застосування таких моделей для аналізу процесів пресування, подрібнення, змішування ДМ з твердою фазою органічного походження обмежується відсутністю даних про реологічні властивості відповідних фаз. Тому, **метою роботи** є розроблення методів та проведення експериментальних досліджень по визначенню структурно – механічних та реологічних параметрів твердої фази ДМ типу лушпиння зернових культур, соломи, стружки деревини та ін.

Математична модель. Розглядаючи конкретну переробну технологію,

© Е.В. Штефан, С.І. Блаженко, 2012

приймаємо концепцію подання сировинних дисперсних мас як двохфазних сумішей пористої або зернистої твердої деформованої структури з рідиною чи газом, яку надалі будемо розглядати у вигляді моделі суцільного текучого середовища з приписуваними їй фізичними властивостями, які феноменологічно відображають молекулярну структуру середовища і внутрішні рухи речовини, що відбуваються в ній.

Для описання механічної поведінки таких матеріалів необхідно використовувати поняття напружень, деформацій, щільності, а також швидкості зміни цих параметрів.

Ці тензорні та скалярні характеристики мають локальну природу і визначаються за допомогою операцій граничного переходу, коли елементи простору (об'єми і поверхні) стягуються до точок (матеріальних).

У традиційних моделях континуума точки ототожнюють з частками середовища (нескінченно малий об'єм матеріального континуума), а ті, у свою чергу, є елементарними носіями властивостей матеріалу.

Подібне ототожнення в дисперсній масі з твердою фазою рослинного походження ускладнюється через брак єдиної думки про те, що потрібно розуміти під часткою такого середовища.

Динамічні аспекти механічної поведінки ДМ регламентуються рівняннями балансу у формі закону збереження кількості руху з врахуванням закону збереження маси у межах представницького елемента (ПЕ) ДМ. При цьому для кожної з фаз ДМ рівняння відносного руху фаз представляються у вигляді [1]:

$$\alpha_1 \left(\rho_1 \frac{d\mathbf{u}}{dt} - \rho_2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) - \nabla \boldsymbol{\sigma}^f - \frac{\mathbf{R}}{\alpha_2} - \alpha_1 (\rho_1 - \rho_2) \mathbf{G} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla \mathbf{P} - \frac{R}{\alpha_2} + \rho_2 \mathbf{G} = 0, \quad (2)$$

де відповідно до конкретного механізму взаємопроникнення фаз дисперсної системи (фільтрація, дифузія і т.п.) враховується сила \mathbf{R} , яка пропорційна відносній середній швидкості потоку газорідкої фази (аналог сили в'язкого опору):

$$\mathbf{R} = \frac{\mu}{a^2} \alpha_1 \alpha_2 (\mathbf{v} - \mathbf{u}), \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості (кг с/м) для нестисливої рідини; a – узагальнений коефіцієнт, що враховує конфігурацію простору пор дисперсійного середовища.

Для формулювання визначальних співвідношення (між деформаціями та напруженнями) у межах ПЕ ДМ розроблена методика, яка складається з наступних етапів:

1. Вводиться у розгляд два рівні структурного аналізу ДМ – мікроаналіз (на основі розглядання окремого мікро-фрагменту (частки) дисперсної системи формулюються співвідношення щодо параметрів його механічної поведінки) та макроаналіз, де виконується осереднення параметрів по макро-об'єму ПЕ. Запропоновано ввести у розгляд ідеалізований мікро-фрагмент ДМ – елементарний об'єм у вигляді кругового порожнього циліндра (рис. 1).

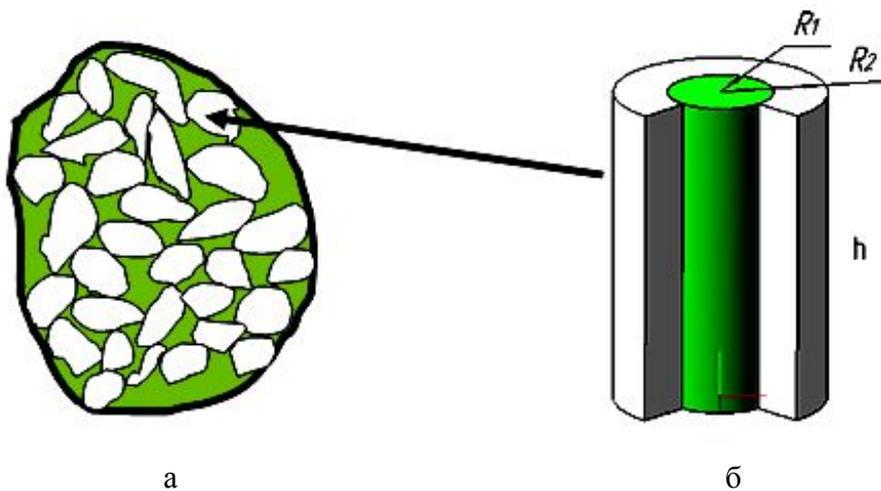


Рис. 1 – Макро-фрагмент (а) та ідеалізований мікро-фрагмент (б) ДМ

Матеріал даного циліндра (тверда фаза ДМ на мікро рівні) вважається нестисливим, а його вісь збігається з напрямком одного з головних компонентів тензора швидкостей деформації.

В області зайнятій циліндром $R_1 < r < R_2$; $0 < z < h$ розглядаються тільки два компоненти швидкості переміщень точок матеріалу v_r і v_z , які задовольняють рівнянню нерозривності:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

2. Для нівелювання результатів введеної ідеалізації розглядається параметр швидкості локальної (на мікрорівні) енергії деформування твердої фази з подальшим її осередненням по всьому об'єму циліндра:

$$D = \sigma_0 \gamma_0 \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\psi e^2}{\gamma_0^2} + \frac{\varphi \Gamma^2}{\gamma_0^2}} \right)^{n+1} + \sigma_T \gamma_0 \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\psi e^2}{\gamma_0^2} + \frac{\varphi \Gamma^2}{\gamma_0^2}}. \quad (5)$$

При виведенні (5) враховані параметри дисперсності матеріалу $\alpha_2 = 1 - \alpha_1 = \frac{R_1^2}{R_2^2}$, $\varphi = \alpha_1$; $\psi = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2}$, а також узагальнена реологічна модель ма-

теріалу твердої фази $\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_m$, де σ_T – границя текучості,

$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{R_1^4}{r^4} e^2 + \Gamma^2}$ – параметр інтенсивності швидкостей деформацій ПЕ, σ_0 ,

γ_0 , n – константи апроксимації експериментальних даних; e , Γ – перший та другий інваріанти тензора напружень; $w = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\psi e^2 + \varphi \Gamma^2}$.

3. На основі (5) формулюється загальна структура визначальних співвідношень через компоненти тензорів напружень σ_{ij} і швидкостей деформацій e_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{\sigma_0 \left(\frac{w}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_T}{w} \right) \left[\varphi e_{ij} + \left(\psi - \frac{1}{3} \varphi \right) e \delta_{ij} \right], \quad (6)$$

Експериментальні дослідження проведені з використанням спеціального пресуючого обладнання, яке забезпечує високий тиск (400 – 500 МПа) ущільнення ДМ з незначним (в ідеалі наближеним до нуля) об'ємним вмістом дисперсійного середовища. Отриманий таким способом матеріал можна умовно вважати компактним (однофазним), тобто матеріалом твердої фази досліджуваного ДМ. Згідно розробленої методики [4] отримано набір зразків, що представляють собою тверду фазу лузги соняшника та гречки, стружки сосни та дуба, соломи та висівок. Проведено експериментальні випробування цих зразків з метою визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона відповідних матеріалів. Для експериментальних випробувань було використано універсальну випробувальну машину TIRATEST-2151.

Оброблення результатів проведених досліджень (рис. 2) дозволили визначити значення реологічних параметрів, що представлені у табл. 1.

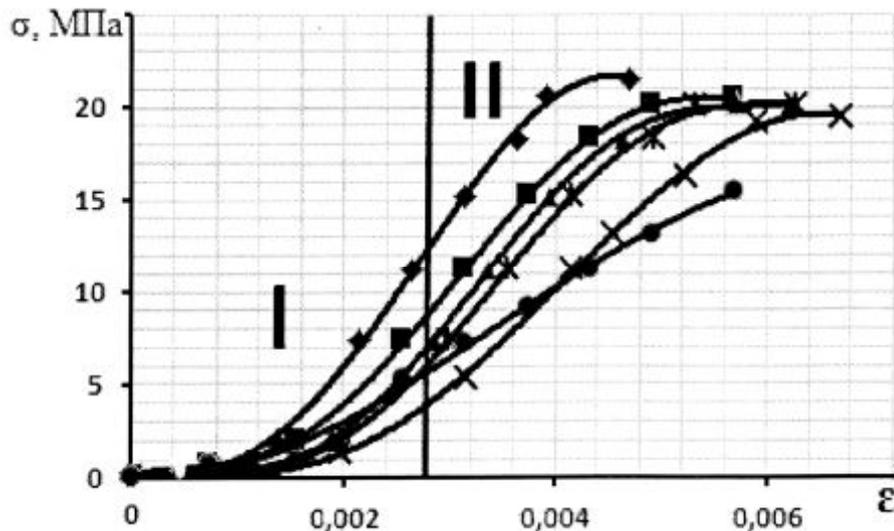


Рис. 2. Діаграми деформування зразків з: \blacklozenge – лушпиння соняшника; \blacksquare – соломи; \blacktriangle – лушпиння гречки; \bullet – висівок; \times – стружки дуба; $*$ – стружки сосни

Таблиця 1 – Реологічні константи твердої фази досліджуваних зразків

№	Тип зразка	Коефіцієнт Пуассона	Модуль пружності, ГПа
1	Лушпиння соняшника	0,125	3,4407
2	Стружка сосни	0,118	2,6804
3	Лушпиння гречки	0,123	3,1254
4	Стружка дуба	0,127	2,9874
5	Солома	0,124	3,1584
6	Висівки	0,134	2,1458

Аналіз отриманих діаграм показує, що досліджувані матеріали є нелінійно пружними.

На першій ділянці модуль Юнга є змінним в залежності від прикладеного навантаження, на даній ділянці проходить поступове зникнення пор (мікророзорів) між частинками дисперсної фази, що утворились в результаті часткової релаксації матеріалу.

На другій ділянці, характер якої близький до лінійного, величина модуля Юнга залишається сталою (погрішність в межах 5 – 15 %), на ділянці відбувається деформування безпосередньо дисперсної фази.

Висновки.

Отримані результати дозволяють замкнути рівняння представленої математичної моделі та забезпечити адекватність проведення відповідних обчислювальних експериментів.

Список літератури: 1. *Штефан Є.В.* Построение аналитической модели процессов деформирования дисперсных материалов / *Є.В. Штефан, С.И. Блаженко* // *Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследования, технологии, оборудование.* – 2003. – Вып. № 13. – С. 26 – 33. 2. *Штефан Є.В.* Інформаційні технології проектування обладнання для мундштучного пресування керамічних мас / *Є.В. Штефан* // *Зб. наук. праць ВАТ «УкрНДІВогнеупорів ім. А.С. Бережного».* – 2010. – № 110. – С. 593 – 598. 3. *Штефан Є.В.* Розроблення інформаційних технологій проектування машин та апаратів харчових виробництв / *Є.В. Штефан* // *Наукові праці ОНАХТ.* – 2006. – Вип. 28, Т. 2. – С. 222 – 223. 4. *Штефан Є.В.* Експериментальний метод дослідження реологічних властивостей органічних матеріалів – відходів зернової промисловості / *Є.В. Штефан, Д.В. Риндюк* // *Наукові праці НУХТ.* – 2008. – № 25. – С. 106 – 108.

Поступила в редколегію 28.08.12

УДК 678.05+678.02

Побудова математичної моделі процесів механічного оброблення дисперсних матеріалів органічного походження / *Є.В. ШТЕФАН, С.І. БЛАЖЕНКО* // // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 132 – 137. – Библиогр.: 4 назв.

Рассмотрена проблема определения модуля упругости и коэффициента Пуассона дисперсных материалов типа лузги подсолнуха, соломы, жома, пивной дробины, древесной стружки и подобных материалов. Представлена методика экспериментального определения модуля упругости и коэффициента Пуассона дисперсных материалов.

Considered problem of determination of the module of resiliency and coefficient of Pyasson of dispersible materials of type of husk of sunflower, straw, bagasse, beer pellet, arboreal shaving and similar materials. Presented methodology of experimental determination of the module of resiliency and coefficient of Pyasson of disperse materials.

Я. І. БІЛИЙ, д-р техн. наук, проф.,

Я. І. КОЛЬЦОВА, канд. техн. наук, доц.,

С. В. НІКІТІН, асп., ДВНЗ "УДХТУ", Дніпропетровськ;

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ОТРИМАННЯ ПОРИСТИХ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ БОЮ ВІКОННОГО СКЛА ТА ЛЕГКОПЛАВКИХ ГЛИН

У статті наведені основні властивості легкоплавких глин Дніпропетровської та Запорізької областей; встановлена можливість використання суглинків в композиції з боєм віконного скла для отримання пористих склокристалічних матеріалів будівельного призначення при понижених температурах випалу.

Ключові слова: пористі матеріали, піноскло, глини, скло, теплоізоляція.

Вступ. У наш час пористі матеріали знайшли широке застосування у різних галузях промисловості, побуті, науці та техніці. Їх повсякчас використовують в якості тепло- та звукоізоляції, для фільтрування газів та рідин, для каталітичних та масообмінних процесів, для кісного протезування у медицині [1 – 3].

Аналіз останніх досліджень та літератури. У будівництві, завдяки комплексу корисних властивостей, найбільшого розповсюдження набули силікатні пористі матеріали. Серед них окрему увагу заслуговує піноскло. Воно є стійким до гниття, дії мікроорганізмів, комах та гризунів; не горить, є хімічно стійким до більшості середовищ, його можна різати, свердлити, шліфувати. Для отримання піноскла використовується спеціально зварене скло або склобій, а в якості пороутворювачів – карбонати кальцію та магнію, кокс, сажа та інші.

Склобій має температуру початку розм'якшення 550 – 700 °С, а його використання, як складового техногенного матеріалу, дозволяє знижувати енерго- та матеріальні витрати при варці відповідних стекл та виробництві піноскла [4].

Для виробництва будівельної кераміки здебільшого використовуються легкоплавкі глини, які є одними з поширеніших та дешевих природних сировинних матеріалів. Такі глини уявляють собою породи, які в основному скла-

даються з глинистих мінералів (гідроалюмосилікатів) та різних домішок.

Відмінною особливістю будови глинистих мінералів є їх слоїста структура [5], яка представлена пакетами з шарами кремнійкисневих тетраедрів та кисневогідроксильних октаедрів (з іонами Al, Mg і Fe), що чергуються між собою. Така будова обумовлює здатність глинистих мінералів до поглинання вологи, яка потрапляє між пакетами, та їх схильність до набухання. При нагріванні глинистих матеріалів спочатку втрачається вільна, а потім і хімічно зв'язана вода. Втрата останньої відбувається за температур вище 450 °С (переважно при 550 – 700 °С).

До мінеральних домішок глинистих матеріалів відноситься кремнезем, що у вільному стані знаходиться у вигляді тонкодисперсного кварцового піску, присутність якого зменшує зсадження керамічних виробів при нагріванні за рахунок модифікаційних перетворень. В глинах також містяться вапняк – CaCO₃ та доломіт – CaCO₃·MgCO₃ (в результаті їх термічної дисоціації виділяється вуглекислий газ – CO₂) ; гідрослюди, сульфіді, а також органічні домішки у вигляді вуглевміщуючих речовин.

Мета. Враховуючи вищезазначене, метою даної роботи стало дослідження можливості одержання пористих склокристалічних матеріалів на основі бою віконного скла та легкоплавких глинистих матеріалів, які здатні утворювати достатню кількість газової фази для спучення розм'якшеної скломаси, при їх випалі.

Матеріали досліджень. Для отримання пористих склокристалічних матеріалів в роботі використовувались глини родовищ Дніпропетровської (Сурсько-Покровське) та Запорізької (Новоукраїнське) областей сумісно з боєм віконного скла (табл. 1). Вказані дослідні глинисті матеріали є полімінеральними різновидами гідрослюдисто-каолінітового складу з домішками монтморилоніту; основні їх властивості наведені у табл. 2.

Таблиця 1 – Хімічні склади дослідних глин та бою скла, мас. %

Назва матеріалу	Найменування компонентів								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	ппп
глини червоно-бурі	56–60	12–15	5–7	4–7		1–2		0,02	9–12
суглинки	65–71	8–11	2,3–3,8	8–10		3,0–3,1		0,06	6–8
бій віконного скла [4]	72–72,8	1,5–1,7	0,1	8,0–8,1	3,5–3,8	0,5	13,2–13,5	0,4	–

Таблиця 2 – Властивості дослідних легкоплавких глин

Вид глинистих матеріалів	Число пластичності	Формовочна вологість, %	Повітряна лінійна усадка	Коефіцієнт чутливості до сушіння	Температурний інтервал спікання, °С	Вогнева лінійна усадка, %	Щільність після випалу при 1000 °С, г/см ³	Водопоглинання після випалу при 1000 °С, %	Відкрита пористість після випалу при 1000 °С, %
червоно-бурі	24–25	20–21	6,3–6,8	2,2–2,4	950–1050	0,40–0,45	1,8–1,9	9–10	19–20
суглинки	8,5–9,0	18,0–18,5	1,8–2,0	0,4–0,5	1000–1100	0,90–0,95	1,5–1,6	24,5–25,0	40–41

З метою визначення окремих процесів, що протікають при термообробці дослідних глин, був проведений їх термогравіметричний аналіз (рис. 1, 2).

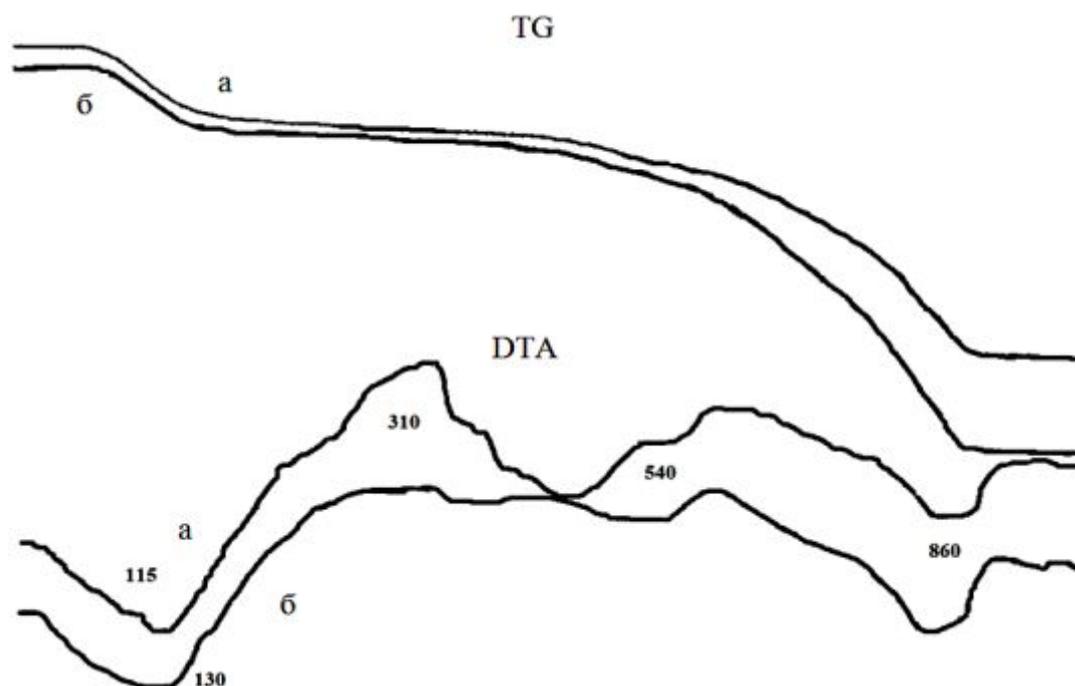


Рис. 1 – Дериватограми суглинків Сурсько-Покровського (а) та Новоукраїнського (б) родовищ

При цьому слід зазначити, що термограми дослідних глинистих матеріалів є достатньо подібними: при нагріванні їх до температури 115 – 200 °С відбувається видалення вільної та міжпакетної вологи; ендоефекти в інтервалі температур 540 – 700 °С пов'язані з модифікаційними перетвореннями

кварцу та видаленням хімічно-зв'язаної вологи із каолініту та монтморилоніту, а в інтервалі температур 750 – 900 °С – з процесами декарбонізації кальциту, доломіту та магнезиту. При подальшому підвищенні температури екзо-ефекти слабкої інтенсивності, відповідають кристалізації новоутворень (первинного муліту). Відмічене узгоджується з літературними даними [6].

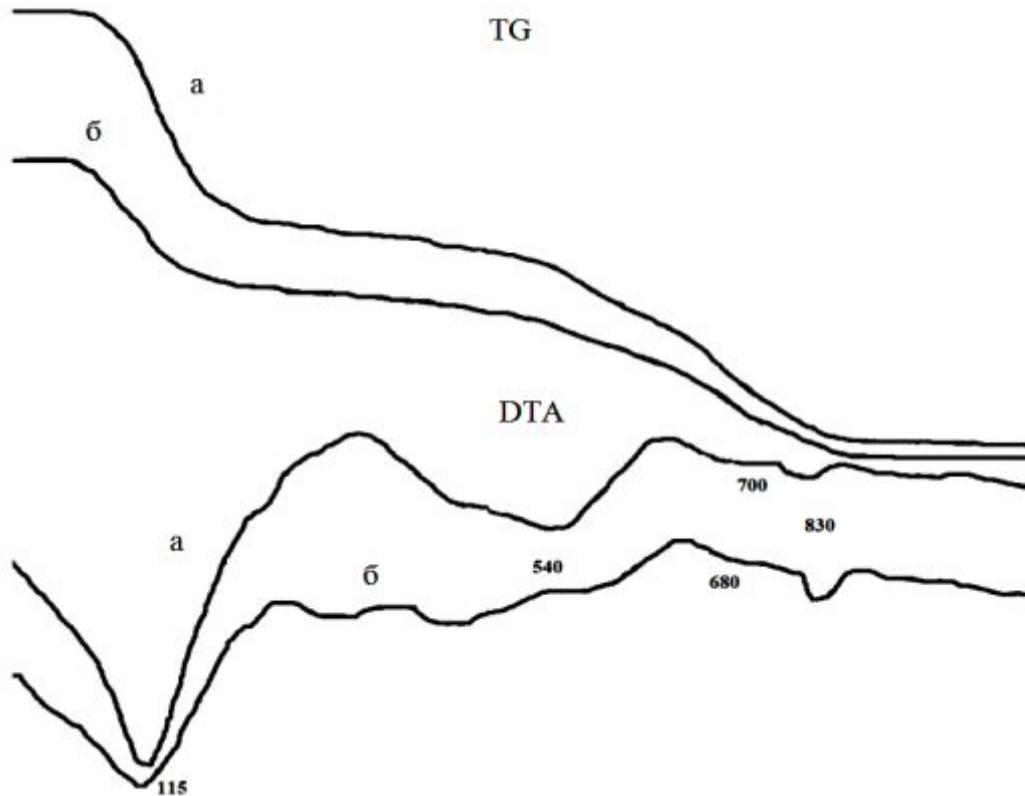


Рис. 2 – Дериватограми червоно-бурих глин Сурсько-Покровського (а) та Новоукраїнського (б) родовищ

В якості основного структурно аморфного компоненту в роботі використовувався бій віконного скла, який на сьогодні є одним з найпоширеніших вторинних видів стекол.

Вказані сировинні матеріали (глини та скlobій) окремо подрібнювалися у кульовому фарфоровому млині з керамічними мелючими тілами до проходу крізь сито № 01 (3460 отв./см²). З подрібнених порошків готувались дослідні маси, які змішувалися, а потім зволожувалися (до 10 %) та протиралися крізь сито № 1 (54 отв./см²). З отриманих порошкових сумішей методом напівсухого пресування формували зразки циліндричної форми (d = 24 мм), які після сушки при кімнатній температурі випалювали у камерній муфельній електричній печі. На випалених зразках визначалась зміна лінійних розмірів, об'єму та розраховувався їх коефіцієнт спучування (K_v).

Результати досліджень. Експериментально встановлено, що дослідні червоно-бурі глини при будь-якій кількості у дослідних масах призводять до спікання зразків. У той час як суглинки тих самих родовищ в залежності від їх кількості у дослідних шихтах призводять до спучення зразків, причому отримані експериментальні данні з суглинком Сурсько-Покровського родовища майже не відрізняються від результатів отриманих з суглинком Новоукраїнського родовища.

Аналіз властивостей зразків, випалених при 750 °С (табл. 3), дозволив визначити чітку тенденцію збільшення коефіцієнту спучення зі збільшенням кількості суглинків у дослідних шихтах від 5 до 17,5 % (тут і надалі мас. %).

Подальше збільшення їх вмісту призводить до поступового зменшення значень K_v до 1 (рис. 3).

Таблиця 3 – Характеристики окремих зразків дослідних композицій до та після випалу (750 °С)

№ шихти	Вміст компонентів, %		$V_1,^*$ см ³	$V_2,^*$ см ³	$\Delta V,^*$ см ³	K_v	$d^{**},$ мм	кількість пор на 1 см ²
	склобою	суглинку						
1	95	5	4,15	5,7	+1,55	1,37	–	–
2	90	10	4,00	16,0	+12,00	4,00	0,61	>50
3	85	15	3,88	18,5	+14,62	4,77	1,23	>50
4	80	20	3,98	20,0	+16,02	5,00	1,72	45
5	75	25	3,80	14,5	+10,70	3,80	2,51	25

* V_1, V_2 – об'єм дослідних зразків до та після випалу, ΔV – різниця між V_2 та V_1 ; ** d – середній діаметр пор дослідних зразків після випалу.

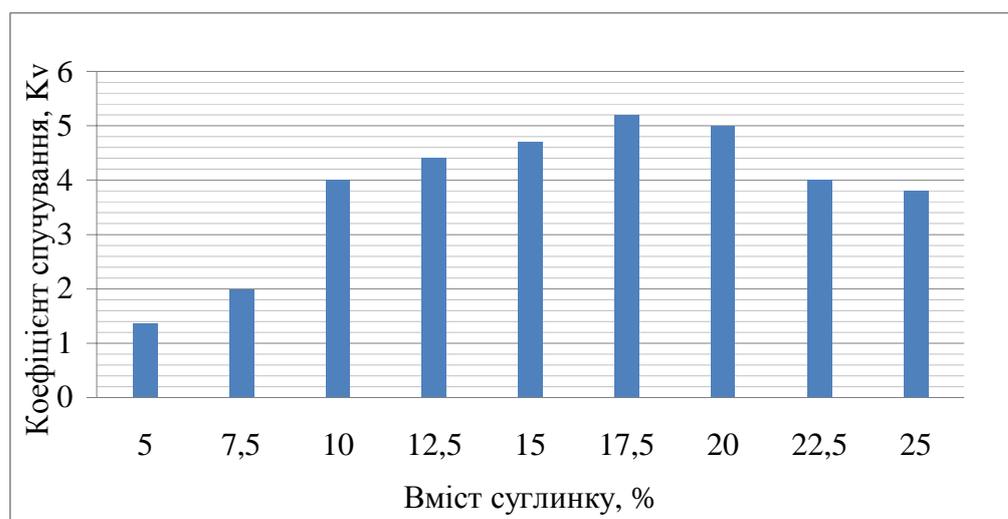


Рис. 3 – Залежність коефіцієнту спучення дослідних мас від вмісту суглинку

Як слідує з рисунку 3, найбільший коефіцієнт спучування досягається при вмісті суглинку 17,5 %.

Однак такий зразок має дещо неоднорідну структуру з окремими ніздрюватими порами діаметром до 4 мм.

Найбільш однорідна дрібнопориста структура в дослідних зразках досягається при вмісті суглинку 10 – 12,5 % (рис. 4б).

Вміст суглинку, %



Рис. 4 – Зовнішній вигляд (а) та горизонтальний переріз (б) зразків, випалених при 750 °С

Аналіз фазового складу зразка із вмістом 15 % суглинку вказує на присутність кристалічної фази, яку за наявності характерних дифракційних максимумів можна віднести до девітриту (рис. 5б).

В той час як зразок, сформований з віконного скла без добавки суглинків та випалений в тих самих температурно-часових умовах є рентгеноаморфним (рис. 5а).

Таким чином, суглинок сприяє утворенню кристалічної фази, що зазвичай присутня при розкловуванні листового скла.

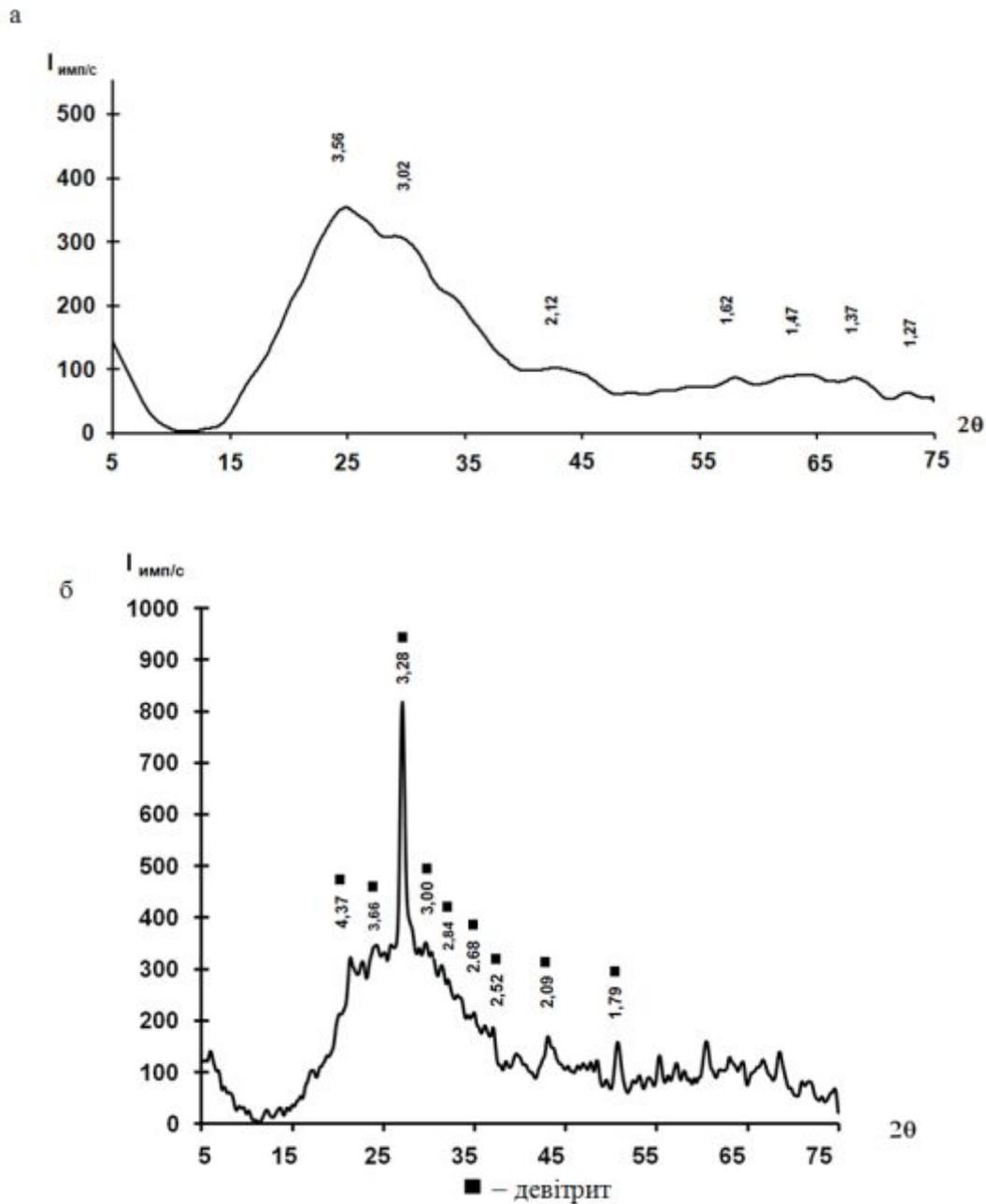


Рис. 5 – Фазовий склад випаленого при 750 °С склобою (а) та дослідного матеріалу з вмістом суглинку (б)

Висновки

Виконаними експериментальними дослідженнями встановлена:

- принципова можливість синтезу пористих склокристалічних матеріалів на основі лише бою скла та легкоплавких глинистих матеріалів – суглинків;

- можливість, в залежності від концентрації суглинків та склобою в дослідних масах, змінювати структуру пористих склокристалічних матеріалів, а саме: – для отримання однорідної дрібнопористої структури матеріалу (діаметр пор 0,5 – 1,0 мм), вміст суглинку в складі маси повинен складати 10 – 12,5 %, а для отримання крупнопористої структури, подібної до керамзиту (діаметр 2 – 5 мм), який за відомою технологією випалюється при температурах 1150 – 1250 °С [7] вміст суглинку необхідно збільшити до 20 %.

Для вказаних пористих матеріалів достатньою є температура випалу 750 °С.

Одержані склокристалічні зразки на основі бою віконного скла та легкоплавких глин (суглинків) мають $K_v = 5,2$, міцність на стиск 3 – 7 МПа, об'ємну вагу 220 – 300 кг/м³ та теплопровідність 0,05 – 0,075 Вт/м·°С.

Перевагою таких матеріалів є те, що вони не вміщують шкідливих для людини і навколишнього середовища компонентів.

Їх виробництво може суттєво знизити енерго- та матеріальні витрати в порівнянні з виготовленням піноскла за традиційною технологією [8, 9].

Синтезовані склокристалічні матеріали можна рекомендувати як в якості теплоізоляційних, так і заповнювачів у легких бетонах.

Список літератури: 1. Черный А.А. Пористые материалы и изделия, их улучшение на основе математического моделирования / А.А. Черный, В.А. Черный. – Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2007. – 36 с. 2. Симельников Ю.И. Пористые сетчатые материалы / Ю.И. Симельников, А.Ф. Третьяков, А.Г. Колесников. – М.: Металлургия 1983. – 64 с. 3. Баринов С.М. Биокерамика на основе фосфатов кальция / С.М. Баринов, В.С. Комлев. – М.: Наука, 2005. – 201 с. 4. Яцишин Й.Н. Технологія скла: підручник у III частинах / [Й.Н. Яцишин, Я.И. Вахула, Т.Б. Жеплинский, Козий А.И.] – Л.: Растр-7, 2011. – Ч. III: Технологія скляних виробів. – 2011. – 416 с. 5. Мороз И.И. Технология строительной керамики / И.И. Мороз. – К.: Вища школа, 1972. – 416с. 6. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ: уч. пособие / В.С. Горшков, В.Г. Тимошев, В.Г. Савельев. – М.: Вища школа, 1981. – 335 с. 7. Юшкевич М.О. Технология керамики / М.О. Юшкевич, М.И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1969. – 351 с. 8. Китайгородский И.И. Пеностекло / И.И. Китайгородский. – М.: Стройиздат, 1953. – 79 с. 9. Шилл Ф. Пеностекло / Ф. Шилл: [пер. Г.М. Матвева]. – М.: Стройиздат, 1965. – 308 с.

Надійшла до редколегії 01.09.12

Про можливість отримання пористих склокристалічних матеріалів з використанням бою віконного скла та легкоплавких глин / Я. І. БЛИЙ, Я. І. КОЛЬЦОВА, С. В. НІКІТІН // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 138 – 146. – Библиогр.: 9 назв.

В статье приведены основные свойства глин Днепропетровской и Запорожской областей; установлена возможность использования суглинков в композиции с боем оконного стекла для получения пористых стеклокристаллических материалов строительного назначения при пониженных температурах обжига.

In this article the main properties of fusible clay of Dnipropetrovsk and Zaporizhye regions are presented; the possibility of loam use in composition with glass breakage for obtaining of building porous glass crystalline materials at low firing temperature is established.

В.В. ПЕСЧАНСКАЯ, канд.техн.наук, доц., НМетАУ, Днепропетровск,
Ю.А. ОНАСЕНКО, асп., НМетАУ, Днепропетровск

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ В СИСТЕМЕ «АЛЮМИНАТКАЛЬЦИЕВЫЙ ЦЕМЕНТ – МИКРОКРЕМНЕЗЕМ»

В статье приведены результаты исследований процесса гидратации композиций «алюминаткальциевый цемент – микрокремнезем». С использованием рН-метрии, методов рентгенофазового анализа, ИК-спектроскопии, растровой микроскопии исследовано влияние количества микрокремнезема на изменение характера процесса гидратации цемента. Установлен механизм гидратации и твердения цемента в присутствии микрокремнезема низкого качества.

Постановка проблемы. Перспективным направлением создания эффективных композиционных материалов, в частности огнеупорных бетонов с низким содержанием цемента, является их модифицирование минеральными добавками. Использование таких добавок является инструментом направленного регулирования процессов гидратации и твердения цемента, реологических свойств, удобоукладываемости, макро- и микроструктуры бетонов, что в сочетании с синтезом новых огнеупорных фаз при высоких температурах, обеспечивает получение бетонов с комплексом заданных физико-технических и эксплуатационных свойств.

© В.В. Песчанская, Ю.А. Онасенко, 2012

К модификаторам полифункционального действия относятся кремний-содержащие добавки: коллоидный кремнезем, золи кремниевой кислоты, диспергирующий кремнезем, микрокремнезем [1 – 5], из которых наиболее широкое применение получили добавки микрокремнезема, представляющего собой отходы металлургических производств. Учитывая то, что морфология, гранулометрический и химико-минералогический состав микрокремнезема и алюминаткальцевого цемента, количество модификатора существенно влияют на характер и кинетику гидратации, формирование структуры цементного камня, исследование системы «алюминаткальцевый цемент – микрокремнезем» является важной научно-практической задачей в технологии изготовления низкоцементных огнеупорных бетонов.

Анализ литературы. Как универсальный микрозаполнитель и гидравлически активная добавка, микрокремнезем является дополнительным источником центров кристаллизации новообразований при гидратации цемента и оказывает положительное действие на формирование микроструктуры бетона [4, 6, 7]. Неоднозначно влияние микрокремнезема на скорость гидратации цемента, образование и осаждение кристаллогидратов: в одних случаях он выступает в роли добавки-ускорителя гидратации цемента [3, 8]; в других, замедляя растворение алюминаткальцевых цементов, увеличивает сроки его схватывания [1, 9].

Различное влияние микрокремнезема на скорость гидратации цемента обусловлено доминирующей ролью примесей (SO_3 , Na_2O , CaO , K_2O , Mg_2O , S , Al_2O_3 , Fe_2O_3), которые изменяют рН среды и характер процессов гидратообразования, и могут оказывать флокулирующее действие, ухудшая подвижность, текучесть и удобоукладываемость бетона [1 – 3, 8, 9].

Различия в химическом составе микрокремнезёмов и избирательное действие примесей на коллоидно-химические и структурно-механические процессы формирования цементного камня определяют необходимость изучения системы «алюминаткальцевый цемент – микрокремнезем».

Цель работы. Цель данной работы – исследование влияния микрокремнезема низкого качества на процессы гидратации, фазообразования и твердения алюминаткальцевого цемента.

Экспериментальная часть. Исследования проводили с использованием рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-3), инфракрасной спектроскопии (спектрофотометр Spectrum One (Perkin Elmer), электронной микроскопии (электронный микроскоп "РЭМ-106И").

В качестве исходных материалов использовали алюминаткальциевый цемент «Gorkal-70», следующего химического состава, %: Al_2O_3 – 70,72, CaO – 28, SiO_2 – 0,32, Fe_2O_3 – 0,96; микрокремнезем в виде шламовых отходов Стахановского завода ферросплавов, с удельной поверхностью 15000 $\text{см}^2/\text{г}$ и химическим составом, %: SiO_2 – 88,6, Al_2O_3 – 1,7, $\text{CaO} + \text{MgO}$ – 2,4, Fe_2O_3 – 3,2, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ – 1,1, C – 2,8, SO_3 – 0,2.

Определение сроков схватывания цемента и его композиций с микрокремнеземом проводили согласно ГОСТ 310.3-76; pH водного раствора над осадком твердой части композиций измеряли на ионометре «И-130».

Микрокремнезем шламовых отходов представлен частицами сферической и удлинённой формы (рис. 1) со средним диаметром до 4 мкм, преимущественно менее 1 мкм, и представляют собой сегрегированные конгломераты.

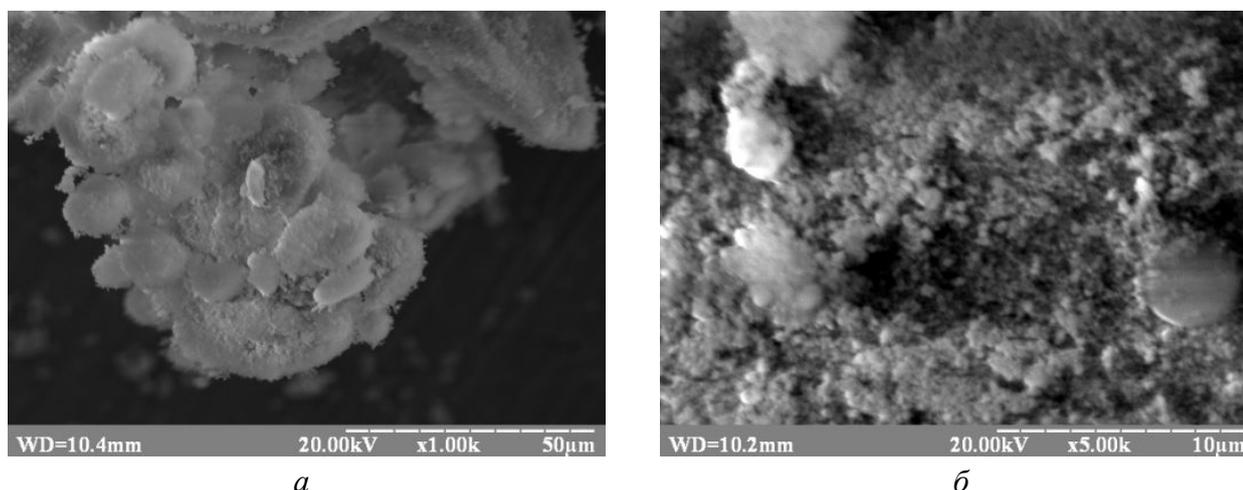


Рис. 1 – Микрокремнезем при увеличении: *a* – 1000; *б* – 5000.

На ИК-спектрограмме (рис. 2) исходного микрокремнезема полосы поглощения в области 470 – 1120 см^{-1} характерны для колебаний группы SiO_4^{4-} (рис. 2, 1), а полосы 1118 см^{-1} , 805 см^{-1} и 480 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям $\text{Si} - \text{O}$ аморфного кремнезема и связи $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$.

Полосы поглощения на ИК-спектрограмме цемента (рис. 2, 2) в области 500 – 870 см^{-1} соответствуют смешанным сложным комбинациям связей $\text{Al} - \text{O}$ и $\text{Ca} - \text{O}$, что характерно для смеси моно-, диалюминатов кальция и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Максимумы поглощения на частотах 880 см^{-1} , 570 см^{-1} и 784 см^{-1} отвечают колебаниям алюминия в октаэдрических координациях $[\text{AlO}_6]$ и тетраэдрических координациях в Al_2O_3 . Полосы поглощения 3435 см^{-1} и 3430 см^{-1} , 1625 см^{-1} и 1624 см^{-1} (рис. 2, 1, 2) характерны для валентных и де-

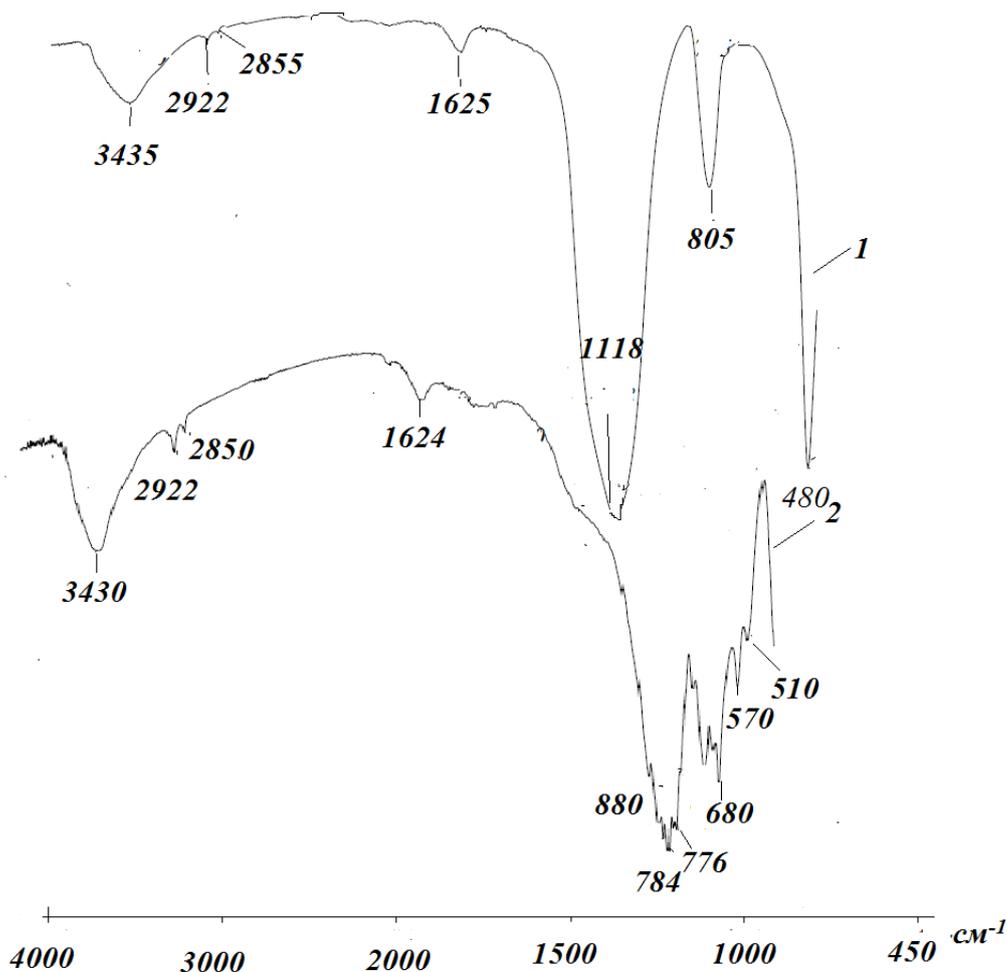
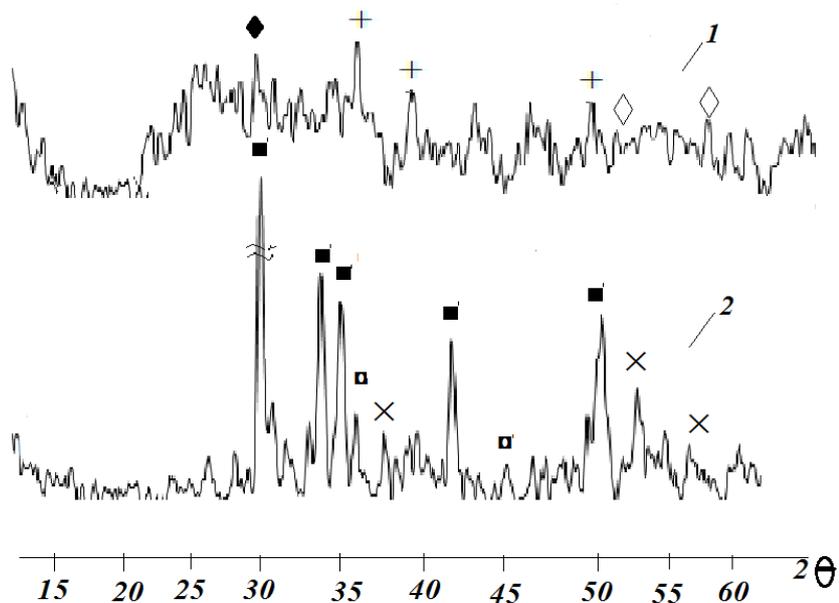


Рис. 2 – ИК-спектры: 1 – микрокремнезем; 2 – цемент.

деформационных колебаний ОН-групп и Н – О – Н, что и свидетельствует о высокой адсорбционной способности и наличии гидроксильного покрова на тонкодисперсных частицах микрокремнезема и цемента. На спектрограммах микрокремнезема и цемента фиксируются полосы низкой интенсивности с максимумами 2922 см^{-1} и 2855 см^{-1} , которые относятся к серосодержащим и карбонильным функциональным группам.

Согласно данным рентгенофазового анализа (рис. 3) исходный микрокремнезем (рис. 3, 1) представлен аморфным кремнеземом, незначительными примесями железа ($d(\text{Å}) - 1,45, 1,69$), углеродсодержащих веществ ($d(\text{Å}) - 3,37$) и кристаллического α -кварца ($d(\text{Å}) - 2,28, 2,58, 1,85$).

На дифрактограмме цемента (рис. 3, 2) рефлексы $d(\text{Å})$: 2,96, 2,51, 2,53, 2,20, 1,92 соответствуют моноалюминату кальция $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (CA), $d(\text{Å})$: 2,08, 1,59, 1,37 – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; слабые рефлексы ($d(\text{Å})$: 2,607, 2,75) свидетельствуют о присутствии в минералогическом составе цемента незначительных количеств диалюмината кальция $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA₂).



■ – CA; × – α -Al₂O₃; + – α -SiO₂; ◆ – C □ – CA₂ ◇ – Fe₂O₃

Рис. 3 – Дифрактограммы: 1 – микрокремнезем; 2 – цемент.

Результаты определения сроков схватывания цемента и модельных смесей «цемент – микрокремнезем» при водотвердом отношении (В/Т) 0,4 показали (таблица), что микрокремнезем интенсифицирует процессы гидратации и твердения цемента, снижая сроки начала и конца схватывания цемента.

Таблица – Состав композиций и сроки схватывания

№	Состав, %		Сроки схватывания, час. - мин.	
	Цемент	Микрокремнезем	начало	конец
1	100	–	2 - 11	7 - 45
2	75	25	0 - 21	5 - 50
3	50	50	1 - 48	6 - 00

Однако, увеличение количества микрокремнезема существенно замедляет гидратацию цемента в начальный период, удлиняя время начала схватывания на, и практически не оказывает влияния на изменение сроков конца схватывания композиций.

Результаты измерения рН растворной части водных суспензий цемента (Ц), микрокремнезема (МК) и их композиций при соотношении Ц : МК = 3 : 1 и 1 : 1 (В/Т = 2) в начальный период, через 24 и 48 час. представлены на рисунке 4.

Адсорбция гидроксильных ионов на поверхности частиц МК, растворе-

ние примесей сопровождается увеличением рН суспензии МК с 8,22 до 8,35 в течение 24 час.

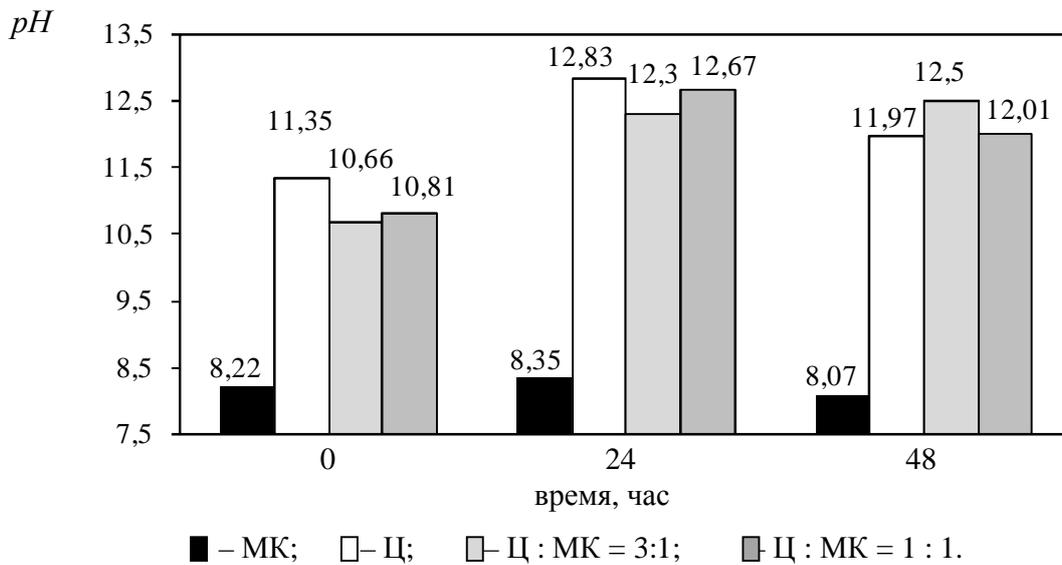


Рис. 4 – Изменение рН водных суспензий

Резкое снижение рН до 8,07 через 48 час. можно объяснить связыванием гидроксидов катионами металлов. Увеличение рН водного раствора цемента с 11,35 до 12,83 в течение 24 час. характерно для алюминаткальциевых цементов и обусловлено растворением алюминатов кальция, насыщением раствора ионами Ca^{2+} и $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ с образованием гидрат-геля (AH_3) и метастабильных кристаллогидратов. Результатом кристаллизации новообразований гидратных фаз является снижение рН до 11,97 через 48 час.

В начальный период гидратации рН композиций, содержащих микрокремнезем, отличается более низкими значениями – 10,66 и 10,81, чем суспензия цемента (рН = 11,35). Однако, через 24 часа рН суспензий резко повышается до 12,3 и 12,67 и незначительно отличается от рН цемента. Существенное увеличение рН обусловлено насыщением раствора катионами растворимых примесей микрокремнезема, причем, чем больше микрокремнезема в композиции, тем выше степень насыщения. Одновременно протекающий процесс растворения цемента сопровождается переходом Ca^{2+} в раствор и адсорбцией ионов на поверхности микрокремнезема, что ускоряет образования структур типа CSH и CASH, которые замедляют процессы растворения цемента, ускоряя при этом осаждение кристаллогидратов цементных фаз. Описанный механизм объясняет замедление начала схватывания композиции Ц : МК = 1 : 1 (таблица).

По истечению 48 час. рН композиции Ц : МК = 3 : 1 повышается незначительно (с 12,3 до 12,5). Резкое снижение рН композиции Ц : МК = 1 : 1 с

12,67 до 12,01 свидетельствует о том, что увеличение количества МК интенсифицирует процесс осаждения кристаллогидратов C_3AH_6 , C_2AH_8 и C_3AH_6 .

ИК-спектрограммы гидратированных материалов и их композиций ($\text{B/T} = 0,4$) в возрасте 2-х суток представлены на рисунке 5.

Сравнительный анализ ИК-спектров гидратированных микрокремнезема и цемента со спектрами исходных материалов (рис. 2) выявил качественные изменения в спектрах. Так, интенсивность полос OH^- групп с максимумами 3435 см^{-1} (рис. 2, 1) и 3430 см^{-1} (рис. 2, 2) увеличивается и смещается в высокочастотную область 3480 см^{-1} (рис. 5, 1) и 3470 см^{-1} (рис. 5, 2). Также отмечено увеличение глубины пиков, отвечающих деформационным колебаниям молекул воды, и появление новой полосы с максимумом 1420 см^{-1} , что вероятно связано с наличием карбоксилатионов и функциональных сульфогрупп $\text{S} = \text{O}$ (рис. 5, 1, 2). В спектре микрокремнезема (рис. 5, 1) полоса с максимумом 528 см^{-1} характерна для валентных колебаний $\text{Me} - \text{O}$ и обусловлена наличием растворимых примесей в составе микрокремнезема.

В ИК-спектре гидратированного цемента (рис. 5, 2) полосы поглощения 540 см^{-1} и 780 см^{-1} отвечают валентным колебаниям связей $\text{Al} - \text{O}$. В области частот $880 - 600 \text{ см}^{-1}$ наблюдаются полосы слабой интенсивности и значительной полуширины, которые можно рассматривать как суммарную полосу образования алюмогеля и гидратов клинкерных минералов. Четко выраженная полоса с максимумом 1026 см^{-1} относится к деформационным колебаниям AlOON -групп и свидетельствует об образовании алюмогеля.

Характерным для ИК-спектров композиций «алюминаткальциевый цемент – микрокремнезем» (рис. 5, 3, 4) является уменьшение интенсивности полос, отвечающих валентным и деформационным колебаниям воды, по сравнению с гидратированными материалами (рис. 5, 1, 2). Ослабление интенсивности полос 1650 см^{-1} и 1640 см^{-1} (рис. 5, 3, 4) свидетельствует об усилении водородных связей по гидроксильным группам. Аналогичные изменения отмечены и для полос в области $418 - 1430 \text{ см}^{-1}$. На спектрограмме композиции, содержащей $\text{Ц} : \text{МК} = 3 : 1$ (рис. 5, 3) уширение полосы с максимумом 780 см^{-1} и 550 см^{-1} свидетельствует о сильном межмолекулярном взаимодействии. Слаборельефная линия в области частот $700 - 600 \text{ см}^{-1}$ (рис. 5, 3) указывает на кристаллизацию гидрокальцийалю-минатов, алюмогеля и отражает сложную картину наложения спектров новообразований кристаллогидратов и структур типа CSH и CASH . Существенным отличием ИК-спектра композиции $\text{Ц} : \text{МК} = 1 : 1$ (рис. 5, 4), является появление четких полос по-

глощения с максимумами 796 см^{-1} , 665 см^{-1} и 550 см^{-1} , которые соответствуют колебаниям связи Al – O. Причем полоса 796 см^{-1} смещена в высокочастотную область и может рассматриваться как результат наложения полос деформационных колебаний Si – O с максимумом 805 см^{-1} (рис. 5, 1) и Al – O с максимумом 780 см^{-1} (рис. 5, 2).

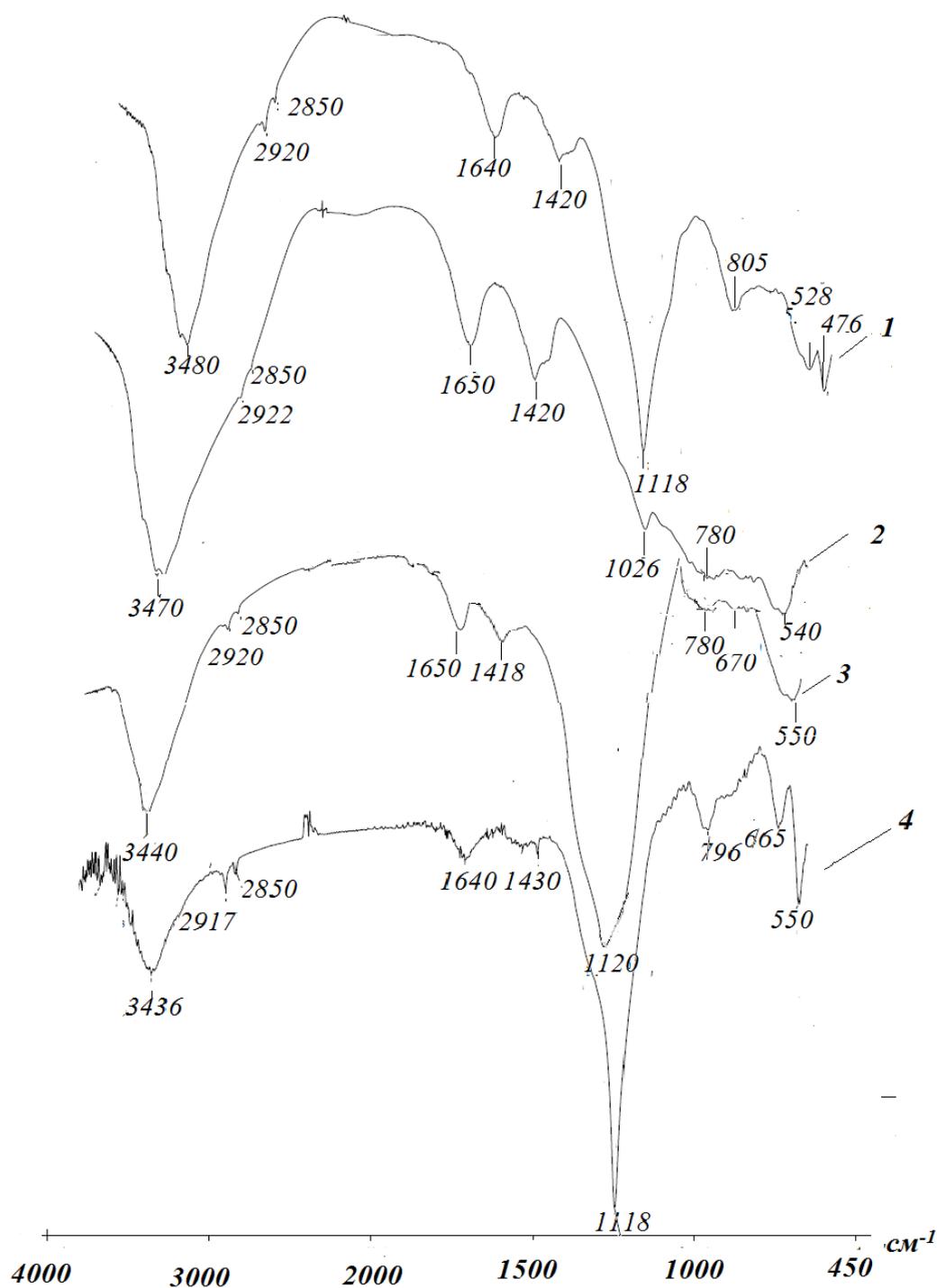
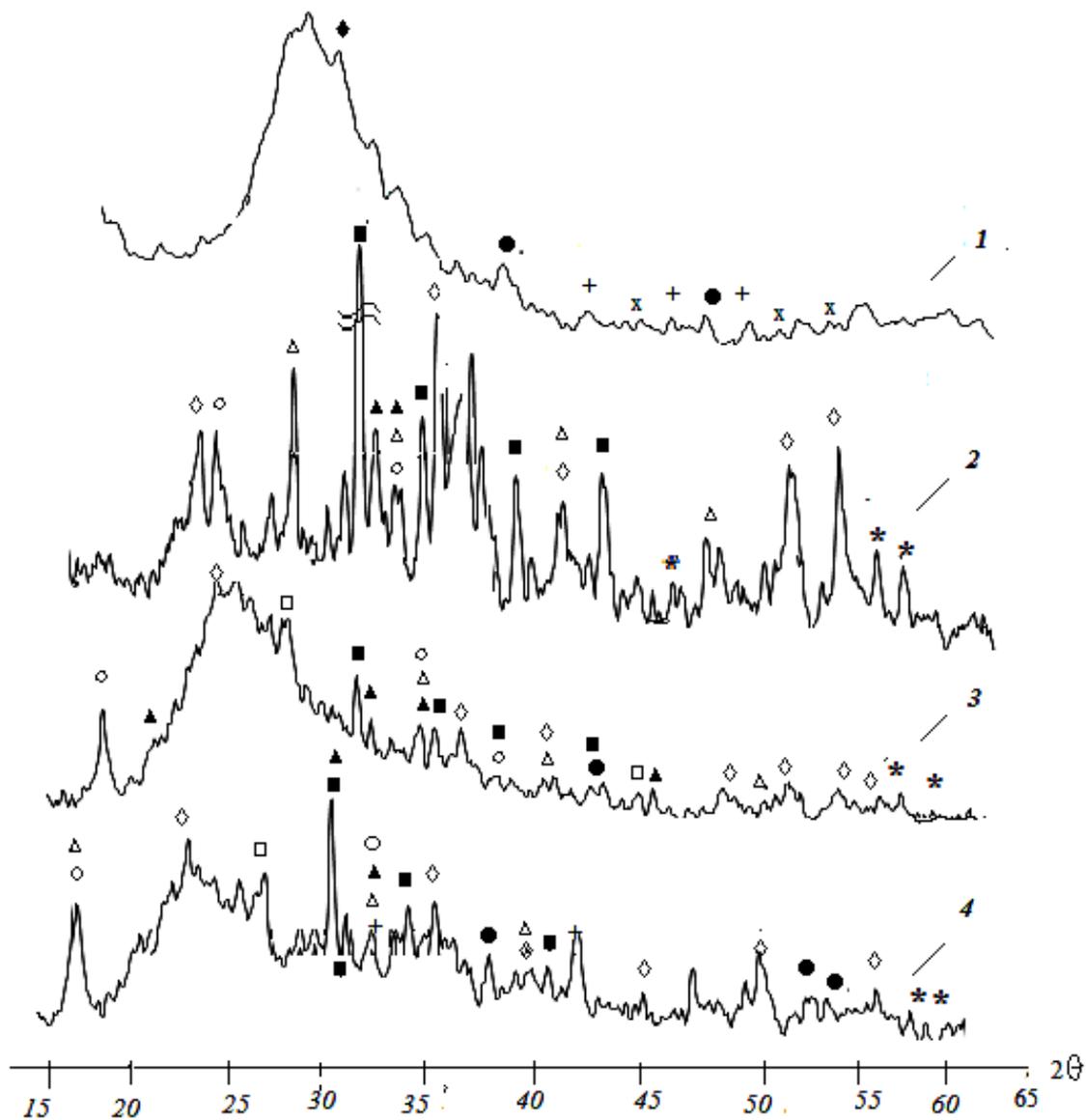


Рис. 5 – ИК-спектры гидратированных материалов: 1 – микрокремнезем (МК); 2 – цемент (Ц); 3 – Ц : МК = 3 : 1; 4 – Ц : МК = 1 : 1.

По результатам рентгенофазового анализа (рис. 6) в гидратированном микрокремнеземе (рис. 6, 1) помимо аморфной фазы, обнаружены пики соответствующие α -SiO₂ (d(Å) – 2,58, 2,28, 1,82), CASH (d(Å) – 2,66, 2,16), и Fe₂O₃(d(Å) – 1,82, 1,45, 1,69).



○ – CAH₁₀; Δ – C₃AH₆; ▲ – C₂AH₈; ■ – CA; □ – CSH; ● – CASH; ◇ – AH₃;
+ – α-SiO₂; × – Fe₂O₃; ◆ – углерод; * – α-Al₂O₃

Рис. 6 – Рентгенограммы: 1 – микрокремнезем (МК); 2 – цемент (Ц); 3 – Ц : МК = 3 : 1; 4 – Ц : МК = 1 : 1.

На рентгенограмме цемента (рис. 6, 2) идентифицированы пики кристаллогидратов кальция CAH₁₀ (d(Å) – 3,29, 2,57) и C₂AH₈ (d(Å) – 2,82, 2,57) и C₃AH₆ (d(Å) – 3,16, 2,57, 1,67), а также гидроксида алюминия AH₃ в форме бемита (d(Å) – 4,35, 2,37, 2,03).

Наличие пиков $d(\text{Å}) - 2,39, 2,50, 2,17, 1,91$, (рис. 6, 2) свидетельствует о присутствии в цементе непрогидратированных минералов цемента моноалюминатов кальция (СА).

Снижение интенсивности дифракционных пиков СА ($d(\text{Å}) - 2,39, 2,50, 2,17, 1,91$) композиций (рис. 6, 3, 4) свидетельствует о более полном прохождении процессов гидратации цемента в присутствии микрокремнезема.

Характерной особенностью исследуемых композиций является наличие пиков, которые соответствуют слабозакристаллизованным структурам типа CASH ($d(\text{Å}) - 2,19, 1,94, 1,29$) и CSH ($3,09, 1,82$), причем их большее количество наблюдается при соотношении Ц : МК = 1 : 1 (рис. 5, 4), что согласуется с результатами определений pH суспензий (рис. 4) и сроками схватывания композиций (таблица).

Положительное влияние микрокремнезема на формирование структуры цементного камня (рис. 7) иллюстрируется растровыми снимками излома образцов в возрасте 2-х суток ($B/T = 0,4$).

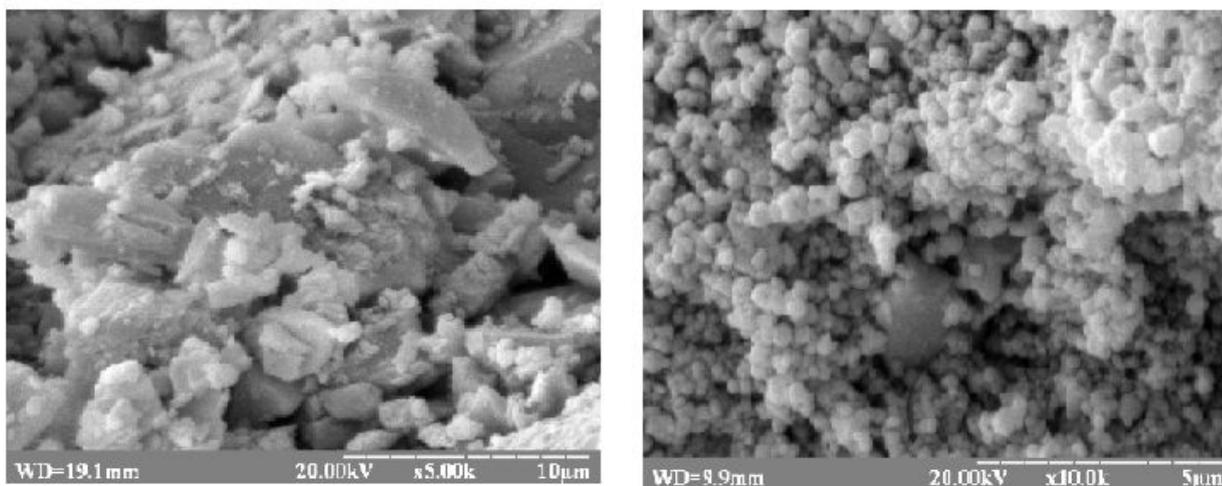


Рис. 7 – Электронно-микроскопические снимки образцов: 1 – цемент (Ц); 2 – Ц : МК = 1 : 1

Присутствие микрокремнезема сглаживает микрорельеф зерен гидратирующегося цемента, уплотняя структуру цементного камня.

Выводы. В результате проведенных исследований установлено влияние количества микрокремнезема низкого качества на процессы растворения алюминаткальцевого цемента и осаждения кристаллогидратных фаз. Предложен механизм воздействия микрокремнезема на процессы гидратации, фазообразования и твердения алюминаткальцевого цемента.

Список литературы: 1. *Парр К.* Алюминаткальциевые цементы для бетонов с пониженным содержанием цемента / [К. Парр, Ф. Симонен, В. Муха и др.] // Новые огнеупоры. – 2006. – № 4. – С. 135 – 141. 2. *Денисов Д.Е.* Дефлокулированные огнеупорные бетоны с высоким содержанием цемента / Д.Е. Денисов, М.Е. Попова, М.В. Максимов // Новые огнеупоры. – 2008. – № 1. – С. 44 – 48. 3. *Гоберис С.* Кинетические особенности алюминатного цемента „Gorkal - 40” в суспензиях с микрокремнеземом и полифосфатом натрия / С. Гоберис, И. Пундене, Э. Спудулис // Цемент и его применение. – 2002. – № 4. – С. 21 – 23. 4. *Myhre V.* Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance / В. Myhre // UNITECR '05: 9-th Biennial Worldwide congress on refractories, nov. 8-11 2005: proceedings. – Orlando, Florida, USA, 2005. – P. 191 – 195. 5. *Семченко Г.Д.* Золь-гель композиции полифункционального назначения / [Г.Д. Семченко, И.Ю. Шутеева, А.Н. Бутенко и др.]; под. ред. Г.Д. Семченко. – Х.: Радуга, 2011. – 240 с. 6. *Сватовская Л.Б.* Активированное твердение цементов / Л.Б. Сватовская, М.М. Сычев. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 160 с. 7. *Тейлор Х.* Химия цемента / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с. 8. *Антонович В.* Исследование возможности применения микрокремнезема низкого качества в среднецементном жаростойком бетоне с дефлокулянтom Castament FS 20 / [В. Антонович, С. Гоберис, И. Пундене и др.] // Новые огнеупоры. – 2007. – № 9. – С. 53 – 57. 9. *Антонович В.* Влияние качества микрокремнезема на реологию цементного теста и характеристики низкоцементного жаростойкого бетона на шамотном заполнителе / [В. Антонович, С. Гоберис, И. Пундене, и др.] // Новые огнеупоры. – 2007. – № 5. – С. 41 – 46.

Поступила в редколлегию 20.10.12

УДК 666.946.6:001.8

Исследование процессов гидратации в системе «алюминаткальциевый цемент – микрокремнезем» / В.В. Песчанская, Ю.А. Онасенко // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 146 – 156. – Библиогр.: 9 назв.

У статті наведено результати досліджень процесу гідратації композицій «алюмінаткальциевий цемент – мікрокремнезем». З використанням рН-метрії, методів рентгенофазового аналізу, ІЧ-спектрометрії, растрової мікроскопії досліджено вплив кількості мікрокремнезему на змінення характеру процесу гідратації цементу. Встановлено механізм гідратації та тужавлення цементу в присутності мікрокремнезему низької якості.

In article results of research of influence of the process of hydration of composition "calcium-alumina cement – microsilica ". Has been researched the influence of amount of the microsilica on the change of character of the cement hydration process by using pH-meters, X-ray diffraction, infrared (IR) spectroscopy, raster microscopy. The mechanism of hydration and hardening of cement with microsilica low quality was established.

Т.Д. РЫЩЕНКО, канд. техн. наук, доц., ХНАГХ, Харьков,
К.И. ВЯТКИН, асп., ХНАГХ, Харьков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ И ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

В статье приведены результаты анализа существующих технологий производств вяжущих материалов с использованием химически активного вторичного сырья, которые показывают целесообразность использования отходов промышленного производства для расширения сырьевой базы цементной индустрии.

В условиях современного производства, жёсткой конкурентной среды, исчерпаемости чистых сырьевых источников актуальным становится вопрос усовершенствования технологического процесса с целью снижения себестоимости готовой продукции, а также использования чистого сырья и энергоресурсов. Высокая стоимость топлива и электроэнергии на украинском рынке вынуждает промышленные предприятия искать пути повышения энергоэффективности производств. Одним из путей решения проблемы является использование отходов и вторичного сырья различных отраслей промышленности строительными предприятиями для изготовления строительных материалов. Учитывая потребности строительной отрасли в высокоэффективных материалах полифункционального назначения, а также энергосберегающий фактор при их производстве актуальным является разработка новых технологий производства материалов с использованием отхода производств и вторичного сырья.

Данную проблематику в своих работах рассматривали многие учёные: Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Горшков В.С., Бутт Ю.М. и другие [1 – 4].

Целью данной статьи является определение преимуществ использования отходов производства и вторичного сырья с высокой химической активностью для интенсификации технологического процесса производства вяжущих материалов, в частности портландцемента.

Анализ существующих технологий производств вяжущих материалов с использованием химически активного вторичного сырья и отходов промыш-

© Т.Д. Рыщенко, К.И. Вяткин, 2012

ленного производства показывает, что наряду с интенсификацией технологических процессов реализуются также такие задачи как:

- экономические: снижение затрат на производственный процесс, повышение энергоэффективности производства;
- экологические: отсутствие необходимости в утилизации или складировании отходов, снижение темпов разработки исчерпаемых природных ресурсов;
- социальные: снижение себестоимости продукции за счет использования отходов приводит к перенаправлению денежных средств на решения социальных вопросов сотрудников предприятия, снижение стоимости товара повышает покупательскую способность потребителей.

В статье приведены направления, по которым отходы промышленности применяются в производстве цемента:

- комплексное использование сырья, расширение сырьевой базы цементной промышленности;
- снижение удельных норм расхода топливно-энергетических и материальных ресурсов и улучшения качества клинкера [1, 2];
- создание новых специальных видов цементов, обладающих повышенными строительно-техническими свойствами: пластичностью, гидрофобностью, морозостойкостью, сульфатостойкостью, жаростойкостью и др.

Современные технологии позволяют использовать отходы металлургической, топливной, энергетической, химической и деревоперерабатывающей промышленности, а также переработки растительного сырья [5, 6]. Металлургия является одной из ведущих отраслей промышленности по объему перерабатываемого минерального сырья и его удельному расходу на тонну конечной продукции. Наиболее значительными по объему отходами металлургии являются попутно добываемые нерудные породы и отходы обогащения, а также шлаки и шламы [7].

Применение маложелезистых шлаков - доменных и феррохромовых - и создание восстановительной среды при плавке позволяют получать в электропечах белые цементы [8].

Отечественная цементная промышленность занимается выпуском обычного, быстротвердеющего и сульфатостойкого шлакопортландцемента.

Содержание шлака в шлакопортландцементе составляет согласно нормам не менее 21 масс. % и не более 60 масс. % цемента.

Также выпускаются безклинкерные шлаковые вяжущие продукты тон-

кого измельчения шлаков, содержащих добавки активизаторов их твердения [9]. Широко распространен гипсошлаковый цемент группы сульфатно-шлаковых, содержащий 75 – 85 масс. % шлака, 10 – 15 масс. % двуводного гипса или ангидрита, до 2 масс. % оксида кальция или 5 масс. % портландцементного клинкера. Химическая стойкость сульфатно-шлакового цемента выше, чем шлакопортландцемента, что обеспечивает возможность его применение в различных агрессивных средах.

Широко распространены известково-шлаковые и шлакощелочные цементы на основе тонкоизмельченного гранулированного доменного шлака [10], а также извести или щелочного компонента соответственно. Это гидравлические вяжущие вещества, которые применяют для изготовления строительных растворов и бетонов марок не выше 200. Известково-шлаковые цементы по прочности уступают сульфатно-шлаковым. Для получения шлакощелочных цементов наиболее перспективными и экономичными щелочными компонентами считаются не чистые химические вещества, а попутные продукты ряда производств, содержащие соединения натрия и калия. Щелочные компоненты, входящие в состав вяжущего, выполняют роль морозостойкой добавки, поэтому шлакощелочные цементы достаточно интенсивно твердеют при отрицательных температурах [11].

Ценным и весьма распространенным минеральным сырьем для производства строительных материалов являются горелые породы и отходы углеобогащения [2]. В меньшем объеме используются другие отходы топливно-энергетической промышленности (каменноугольная смола, пек, торфяная крошка, сланцевая смола). Золошлаковые отходы можно использовать в составе бесклинкерных вяжущих материалов, и в композиции с цементным клинкером как активную минеральную добавку, а также в качестве сырьевого компонента [3].

Химический состав топливных шлаков в зависимости от состава минеральной части твердого топлива изменяется в широких пределах, масс. %: SiO_2 – 35,0 ÷ 65,0; Al_2O_3 – 10,0 ÷ 25,0; CaO – 1,0 ÷ 50,0. В них, как правило, содержится до 20 масс. % и более оксидов железа [4].

Институтом Южгипроцемент на цементном заводе "Первомайский" были проведены успешные испытания по применению золошлаковых отходов Кураховской ГРЭС в качестве алюминатной добавки (4 – 5 масс. %) в сырьевую смесь при обжиге клинкера в печах с конвейерными кальцинаторами. При этом улучшились модульные характеристики сырьевой смеси и содер-

жание алюминатов в клинкере возросло с 4,5 до 8 масс. %. Тонкодисперсную золу-унос можно добавлять непосредственно в сырьевую муку, а золошлаковые отходы необходимо размалывать в сырьевой мельнице совместно с остальными компонентами шихты [5].

Из бесклинкерных зольных вяжущих наиболее известен известково-зольный цемент, получаемый совместным помолом и тщательным смешением измельченных раздельно золы и извести. Состав известково-зольных цементов зависит от содержания в золе активного оксида кальция и минералов, способных к гидратации. Процессом формирования структуры цементного камня можно управлять, добавляя в цемент труднорастворимые соединения [1]. Измененный в их присутствии состав жидкой фазы дает возможность с самого начала направленно воздействовать на формирование структуры цементного камня и оптимизировать его строительные-технические свойства [6].

Разновидностями известково-зольного цемента являются ТЭЦ-цемент и торфозольный цемент. Их получают при сжигании соответственно каменного угля или торфа, предварительно измельченных вместе с известняком. При этом в топках происходит выгорание органических соединений, гидратация и аморфизация глинистого компонента зольной составляющей топлива с частичным ее оплавлением, диссоциация кальцита с образованием тонкодисперсного и активного оксида кальция и взаимодействием его с кислотными оксидами золы топлива [7, 8].

Золы и топливные шлаки могут применяться в качестве сырьевого компонента портландцементного клинкера и активной минеральной добавки при производстве портландцемента, а также композиционных зольных и шлаковых цементов. Золой в составе сырьевой смеси при производстве клинкера можно заменить глинистый и частично известковый компоненты, а в некоторых случаях, улучшить химико-минералогический состав клинкера и условия его обжига [9].

Разработан ряд эффективных зольных цементов на основе летучей сланцевой золы. Гидравлическое вяжущее вещество, получаемое совместным тонким измельчением портландцементного клинкера и мельчайшей фракции летучей золы сланца-кукерсита, называют сланцезольным портландцементом. Возможное содержание золы в этом виде цемента до 25 масс. % [2].

В производстве строительных материалов из отходов и побочных продуктов химической промышленности нашли широкое применение шламы

хлорного производства, используемые, в основном, в качестве добавок к сырью [6], а также шлаки электротермического производства фосфора [7].

Сульфоалюминатный цемент, получаемый с использованием фосфогипса, характеризуется высокой прочностью при любых условиях твердения, что обусловлено высокой плотностью, способствующей снижению испарения влаги [5].

Ташкентскими учеными разработан новый тип вяжущих на основе отходов химической промышленности, содержащий фосфогипс, в качестве сульфосодержащего компонента [10].

Сульфоалюминатно-сульфосиликатный цемент (САС) получают из карбонатного компонента (известняка), алюмосиликатного компонента с повышенным содержанием глинозема (при получении белого цемента – каолиновая глина, обычного цемента – некондиционные бокситы) и сульфосодержащий компонент (фосфогипс). Расчет сырьевых смесей осуществляется для получения вяжущих, состоящих из C_3A_3CS , $C_{12}A_7$, C_3S , $2(C_2S)C\hat{S}$ и nC_4AF , иногда с избытком $CaSO_4$, при этом клинкера с модулем $n_s < 1$ относятся сульфоалюминатно-белитовым (САБ), а при $n_s > 1$ – к сульфоалюминатно-сульфосиликатным (САС) [7]. В производственных условиях температура обжига сульфоминерального клинкера на 200 – 250 °С ниже, чем температура обжига обычного портландцементного клинкера. Сульфоалюминатно-сульфосиликатные цементы являются быстросхватывающимися, быстротвердеющими вяжущими марки не ниже 400 [10].

Вопрос о промышленном использовании фосфогипса для совместного получения цемента и серной кислоты был решен на цементном заводе в городе Линце (Германия) [11]. Решение проблемы утилизации массовых промышленных отходов в строительной индустрии чаще всего осложняется повышенной энергоемкостью переработки за счет высокотемпературных переделов [13], а также необходимости использования высокоактивных химических соединений [13]. С целью поиска рациональных решений в этом направлении был апробирован электротермофосфорный шлак на предмет его использования в материалах контактного твердения [12].

Выводы. Таким образом, в производстве строительных материалов, в частности, цемента в качестве исходных сырьевых материалов все шире используются отходы различных производств. С этой точки зрения актуальным является расширение базы отходов, в том числе и нефте- и газоперерабаты-

вающей отрасли промышленности, которые могут быть использованы в качестве одного из активных компонентов сырьевой смеси для повышения ее реакционной активности.

Список литературы: 1. Пащенко А.А. Энергосберегающие и безотходные технологии получения вяжущих веществ / А.А. Пащенко, Е.А. Мясникова, Ю.Р. Евстюин. – К.: Вища школа, 1990. – 223 с. 2. Пащенко О.О. В'язучі матеріали / О.О. Пащенко, В.П. Сербін, О.О. Старчевська. – К.: Вища школа, 1995. – 440 с. 3. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с. 4. Бутт Ю.М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1973. – 504 с. 5. Чистяков Б.З. Использование минеральных отходов промышленности / Б.З. Чистяков, А.И. Ляпинов. – Л.: Стройиздат, 1984. – 152 с. 6. Сулейменов А.Т. Охрана окружающей среды – совершенствование безотходной технологии / А.Т. Сулейменов. – М.: ВНИИЭСМ, 1979. – 58 с. 7. Пьячев В.А. Новый железосодержащий продукт для сырьевой смеси цементного производства / [В.А. Пьячев, Л.Ю. Лысцова, Т.П. Черданцева, Л.А. Шабалина] // Цемент. – 1996. – № 3. – С. 31 – 32. 8. Гольдштейн Л.Я. Комплексные способы производства цемента / Л.Я. Гольдштейн. – Л.: Стройиздат, 1985 – 157 с. 9. Кац И.К. Новые декоративные вяжущие на основе доломитового сырья с использованием отходов металлургической, химической и других видов промышленности / И.К. Кац // Комплексное использование сопутствующих пород при добыче руд Курской магнитной аномалии в производстве стройматериалов: Всесоюз. науч.-техн. конф., 23-25 окт. 1973 г.: сборник докл. – Белгород, 1973. – С. 20 – 22. 10. Asim M.E. Die Verarbeitung von Hoheferschlacken zu Zuzahlstoffzement, // Zement – Kalk – Gips. – 1992. – № 10. – S. 519 – 528. 11. Жовтая В.Н. Состояние сырьевых ресурсов и использование отходов / В.Н. Жовтая, И.Г. Лугинина // VIII Всесоюз. науч.-техн. совещ. по химии и технологии цемента: 6-7 апр. 1991 г.: сборник докл. – Белгород, 1991. – Раздел 3. – 1991. – С. 298 – 301. 12. Лебедев В.В. Комплексное использование углей / В.В. Лебедев, В.А. Рубан, М.С. Штурт. – М.: Недра, 1980 – 239 с. 13. Pisters H. Schwermetall im Zement-Kriterien fur den Einsatz von Secundarstoffen / H.Pisters // Zement – Kalk – Gips. – 1994. – № 12. – S. 726 – 727.

Поступила в редколлегию 25.10.12

УДК 666.9022.2

Использование вторичного сырья и отходов производства при изготовлении вяжущих материалов / Т.Д. Рыщенко, К.И. Вяткин // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 157 – 162. – Библиогр.: 13 назв.

У статті наводяться результати аналізу існуючих технологій виробництв в'язучих матеріалів з використанням хімічно активної вторинної сировини, які показують доцільність використання відходів промислового виробництва для розширення сировинної бази цементної індустрії.

This article presents the results of analysis of existing technologies manufactures binders with reactive secondary raw materials, which show the feasibility of the use of industrial waste products for the expansion of raw materials of cement industry.

КАРИМИ ЯЗДИ АМИР ЭХСАН, асп., НТУ «ХПИ»,
В.Л. АВРАМЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,
Д.А. МИШУРОВ, канд. хим. наук, доц., НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕМАССОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ ПОЛИАМИДА, ПОЛУЧЕННОГО АНИОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИЕЙ ϵ -КАПРОЛАКТАМА

В статье, с использованием реологического метода исследована зависимость среднемассовой молекулярной массы полиамида-6, полученного методом анионной полимеризации от состава компонентов каталитической системы. В результате исследований определено оптимальное соотношение системы активатор-катализатор. Показано, что при использовании оптимального соотношения компонентов каталитической системы полученный полимер имеет наибольшую среднемассовую молекулярную массу.

Введение.

Для высокомолекулярных соединений характерна полидисперсность (полимолекулярность), поэтому, в отличие от низкомолекулярных веществ, величина их молекулярной массы не является константой, а характеризуется средними значениями. В зависимости от применяемого метода могут быть получены различные значения молекулярной массы: среднечисловое (M_n), среднемассовое (M_w), Z – среднее (M_z) и др.

При этом на среднюю величину молекулярной массы влияет распределение молекул по размерам, которое зависит от условий полимеризации, в частности, от количественного соотношения катализатор – активатор. Учитывая, что процесс анионной полимеризации ϵ -капролактама протекает в расплаве, представляло интерес определение M_w реологическим методом.

Известно, что вязкость расплавов полимеров зависит от ряда факторов: скорости сдвига (γ), температуры (T), давления (P), и состава полимера (химической структуры, молекулярной массы, молекулярно-массового распределения, разветвленности макромолекул и т.д.) [2].

Рассмотрение течения реальных полимерных систем свидетельствует о том, что вязкость, которая характеризует большее или меньшее сопротивление сдвигу слоев относительно друг друга, не является величиной постоянной, а зависит от значения γ .

В большинстве расплавов полимеров вязкость уменьшается с увеличением $\dot{\gamma}$. Такое реологическое поведение полимеров, находящихся в вязкотекучем состоянии объясняется тем, что полимерные системы являются структурированными т. е. системами, которые имеют определенную макро- и микроструктуру. Зависимость вязкости реальных расплавов полимеров от $\dot{\gamma}$ описывается следующим уравнением:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (1)$$

где η – вязкость расплава; k – коэффициент консистенции; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; n – индекс течения расплава.

Однако при достаточно низких скоростях сдвига вязкость полимеров носит ньютоновский характер, т.е. не зависит от $\dot{\gamma}$. Такая вязкость называется вязкостью при нулевом сдвиге (η_0). С учетом η_0 уравнение (1) можно записать как:

$$\eta = \eta_0 \left| \dot{\gamma} \right|^{n-1}, \quad (2)$$

где λ – константа, с единицами измерения времени.

Исходя из того, что реологические свойства полимеров зависят от молекулярных характеристик, можно предположить, что вязкость или данные комплексной вязкости могут быть использованы, для определения молекулярной массы линейных промышленных полимеров.

Согласно динамической теории полимеров Дьюи-Эдвардса [3] вязкость при нулевом сдвиге пропорциональна молекулярной массе полимеров в кубе:

$$\eta_0 \approx M^3, \quad (3)$$

В тоже время согласно экспериментальным данным [3] для высокоструктурированных систем, какими являются расплавы полимеров справедливо:

$$\eta_0 \approx M_w^\alpha, \quad (4)$$

где α – эмпирическая экспонента со значениями от 3,14 до 3,4 [4]

Исходя из вышесказанного, зависимость среднемассовой молекулярной массы от вязкости при нулевом сдвиге для полидисперсных полимеров можно представить в виде уравнения:

$$\zeta_0 = kM_w^{3,4}, \quad (5)$$

где M_w – среднемассовая молекулярная масса.

Материалы и методы исследований

В работе, в качестве мономера для получения полиамида-6 использовался ϵ -капролактam (ММ = 113,16, BASF, Германия), как активатор анионной полимеризации ϵ -капролактама использовали гексаметилендиизоцианат (ГМДИ) (ММ = 168,2 Rhodia, Франция), а в качестве катализатора – натриевую соль ϵ -капролактама (ММ = 147,66 Karangin, Иран). Определяющим (критическим) параметром выбранной системы катализатор-активатор, по которому оценивалась её эффективность, является величина среднемассовой молекулярной массы образующегося полимера. Вязкость при нулевом сдвиге определяли на реометре MCR 300 (Anton Paar GmbH, Германия). Расчет M_w проводили по формуле (5).

Результаты исследований

В табл. приведены соотношения активатора, катализатора и мономера в исследуемых составах и их влияние на среднемассовую молекулярную массу ПА-6 при температуре полимеризации 170 ± 5 °С.

Из данных таблица видно, что наиболее оптимальными составами для получения ПА-6 с наиболее высокой молекулярной массой являются составы 9 ($M_w=52532$) и 13 ($M_w=52501$), которые по значениям молекулярной массы существенно превышают значения M_w промышленного образца ПА-6 (образец 14), полученного гидrolитической полимеризацией.

Кроме того следует отметить, что молекулярная масса полиамида-6 увеличивается с увеличением содержания активатора и катализатора в исходной реакционной смеси. Наиболее высокая молекулярная масса полученного полимера оказалась при содержании активатора и катализатора в исходной смеси 3 – 4 масс. %. Дальнейшее увеличение содержания активатора и катализатора на молекулярную массу образующегося полимера практически влияния не оказывает.

Таблица – Влияние состава исходной смеси на среднемассовую молекулярную массу полиамида-6

№ образца	Содержание, масс. %			η_0 , Па·с	M_w
	ГМДИ	Na–K	ϵ -Капролактам		
1	1	1	98	190	28751
2	1	2	97	215	29801
3	1	3	96	317	33395
4	2	1	97	299	32856
5	2	2	96	310	33205
6	2	3	95	496	38112
7	3	1	96	269	31842
8	3	2	95	293	32631
9	3	3	94	1479	52532
10	4	1	95	268	31796
11	4	2	94	348	34329
12	4	3	93	1476	52496
13	4	4	92	1476	52501
14	-	-	-	872	44985

Выводы

На основании проведенных исследований было установлено, что M_w образцов полиамида-6, полученных при исследуемых режимах полимеризации значительно превышает M_w промышленного образца ПА-6, полученного гидrolитической полимеризацией.

Необходимо отметить, экспериментальные данные по влиянию состава системы катализатор – активатор на M_w образующего полимера хорошо согласуются с экспериментальными данными по определению содержания остаточного мономера, приведенными нами ранее [5].

Список литературы: 1. Стрелихеев А.А. Основы химии высокомолекулярных соединений / А.А. Стрелихеев, В.А. Деревницкая. – М.: Химия, 1976, – 41с. 2. Хувинг Р. Химия и технология полимеров / Р. Хувинг, А. Ставерман. – М.: Химия, 1965. – 377с. 3. Bytner O. Temperature and Molecular Weight Dependence of the Zero Shear-Rate Viscosity of an Entangled Polymer Melt from Simulation and Theory / O. Bytner, G.D. Smith // J. Polym. Sci: Part B: Polym. Phys. – 2001. – Vol. 39, № 24. – P. 3067 – 3071. 4. Ferry, J.D. Viscoelastic Properties of Polymers / J.D. Ferry. – New York: Wiley, 1980. – 325 p. 5. Авраменко В.Л. Анионная полимеризация ϵ -капролактама в присутствии гексаметилендиизоцианата в качестве активатора / В.Л. Авраменко, Карими Язди Амир Эхсан, Ахмади Шервин // Хімічна промисловість України. – 2011. – № 4. – С. 52 – 56.

Поступила в редколлегию 26.10.12

Определение среднемассовой молекулярной массы полиамида, полученного анионной полимеризацией ϵ -капролактама / Карими Язди Амир Эхсан, В.Л. Авраменко, Д.А. Мишуров
// Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія).
– С. 163 – 167. – Библиогр.: 5 назв.

У статті, з використанням реологічного методу досліджена залежність середньомасової молекулярної маси поліаміду-6, одержаного методом аніонної полімеризації від складу компонентів каталітичної системи. В результаті досліджень визначено оптимальне співвідношення системи активатор-каталізатор. Показано, що при використуванні оптимального співвідношення компонентів каталітичної системи одержаний полімер має найбільшу середньомасову молекулярну масу

In paper, with the use of rheological method dependence of weight average molecular weight of polyamide-6 got the method of anionic polymerization from composition of components of the catalytic system is explored. As a result of researches optimum correlation of the system is certain activator-catalyst. It is shown that at the use of optimum correlation of components of the catalytic system the got polymer has most weight average molecular weight.

Зміст

1.	А.В. АНЦИФЕРОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ УДАРА В РАСЧЕТЕ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ	3
2.	И.В. АХМЕТШИНА, И.К. МЛАДЕЦКИЙ ПРИНЦИП ЭКОНОМИЧНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СЕПАРАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО БЛОКА ...	9
3.	А.В. БАШТА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ	15
4.	С.Д. БОРУК, А.И. ЕГУРНОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУСПЕНЗИОННОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА	25
5.	В.Ф. ГАНКЕВИЧ, А.Г. ЛИСНЯК, Л.В. ГРЯЗНОВА ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА КОЛЕСНЫХ ПАР ШАХТНЫХ ВАГОНЕТОК	29
6.	М.Ф. ГНАТЕНКО ФИЗИКА КОНТРОЛЬНОГО ПРОСЕВА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ, КОНСТРУКЦИЯ СИТА И ПРИВОДА	33
7.	П.И. ПИЛОВ, Л.Ж. ГОРОБЕЦ, Н.С. ПРЯДКО, К.А. ЛЕВЧЕНКО, Л.А. ЦЫБУЛЬКО, И.В. ВЕРХОРОБИНА ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ СТРУЙНОЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	37
8.	И.А. ЕМЕЛЬЯНОВА, А.И. АНИЩЕНКО, А.Н. ПЛУЖНИК, В.Ю. ШЕВЧЕНКО ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКТА ОБОРУДОВАНИЯ С БЕТОНОСМЕСИТЕЛЕМ ГРАВИТАЦИОННО-ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ	46
9.	К.Ю. ДЕЙНЕКА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПУЛЬСАЦІЙ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА	55
10.	О.І. ЗЕЛЕНСЬКИЙ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ДОМЕННОГО КОКСУ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОПОРОШКІВ КАРБІДУ КРЕМНІЮ	62
11.	В.В. ИВЖЕНКО, В.А. ПОПОВ, Г.Ф. САРНАВСКАЯ, Л.Д. ЧУЙКО ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАСС НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ НИТРИДОВ КРЕМНИЯ И АЛЮМИНИЯ	67
12.	Д.О. КАПУСТІН ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ КОНЦЕНТРОВАНИХ ЗАЛИШКІВ ВІД СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПАЛИВ	73

13.	С. КОВАЛЬ, В.А. САПОЖНИКОВ ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА ОДНОРОДНОСТЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В ЭЛЕМЕНТЕ	79
14.	О.С. МИХАЙЛЮТА, В.В. КОЛЕДА, Є.В. АЛЕКСЄЄВ, В.В. СЕМ'ЯНИСТА, КЕРАМІЧНІ МАСИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЛІНКЕРНОЇ ТРОТУАРНОЇ ПЛИТКИ ...	86
15.	О.А. КОРНИЕНКО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И СВОЙСТВА ФАЗ В СИСТЕМЕ $CeO_2 - Gd_2O_3$ ПРИ 600 °С	94
16.	С.В. ЛЕНИЧ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ УГЛЯ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕЙ УСТАНОВКЕ	99
17.	А.А. МАЛЬГОТА, В.А. ПРОХОРОВ, А.В. ШОСТАК ЗАМКНУТЫЙ ЦИКЛ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ	105
18.	И.К. МЛАДЕЦКИЙ, Э.М. ПАЙВА РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ В ПУЛЬПЕ	107
19.	В.П. НАДУТЫЙ, А.И. ЕГУРНОВ, В.Ф. ЯГНЮКОВ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ И СОЗДАНИЮ ВИБРОГРОХОТА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТРУДНОГРОХОТИМОЙ ГОРНОЙ МАССЫ	114
20.	Ю.В. НАУМЕНКО ЕКСТРЕМАЛЬНІ ШВИДКІСНІ ДИНАМІЧНІ СТАНИ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА	119
21.	Н.И. СОКУР, Л.М. СОКУР, И.Н. СОКУР ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДРОБИЛКИ ЦД-50 В ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ	126
22.	Е.В. ШТЕФАН, С.І. БЛАЖЕНКО, ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ОРГАНІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ	132
23.	Я. І. БЛІЙ, Я. І. КОЛЬЦОВА, С. В. НІКІТІН ПРО МОЖЛИВІСТЬ ОТРИМАННЯ ПОРИСТИХ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ БОЮ ВІКОННОГО СКЛА ТА ЛЕГКОПЛАВКИХ ГЛИН	138
24.	В.В. ПЕСЧАНСКАЯ, Ю.А. ОНАСЕНКО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ В СИСТЕМЕ «АЛЮМИНАТКАЛЬЦИЕВЫЙ ЦЕМЕНТ – МИКРОКРЕМНЕЗЕМ»	146
25.	Т.Д. РЫЩЕНКО, К.И. ВЯТКИН ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ И ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ	157
26.	КАРИМИ ЯЗДИ АМИР ЭХСАН, В.Л. АВРАМЕНКО, Д.А. МИШУРОВ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕМАССОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ ПОЛИАМИДА, ПОЛУЧЕННОГО АНИОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИЕЙ ε-КАПРОЛАКТАМА	163

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХП»

Збірник наукових праць

Серія:
Хімія, хімічна технологія та екологія

№ 48 (954)

Науковий редактор д-р техн. наук, проф. М.І. Рищенко

Технічний редактор С.З. Зеленцов

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».
Кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей.
Тел.: (057) 707-60-51, e-mail: szelentcov@kpi.kharkov.ua, szelentcov@mail.ru

Обл.-вид № 180-12.

Підп. до друку 22.12.2012 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,5. Облік.-вид. арк. 9,5.
Тираж 300 пр. Зам. № 590342. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16