

**ВЕСТНИК**  
**НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО**  
**УНИВЕРСИТЕТА “ХПИ”**

---

*Сборник научных трудов  
Тематический выпуск  
«Химия, химическая технология и экология»*

**50'2011**

Издание основано Национальным техническим университетом «ХПИ»  
в 2001 году

**Госиздание**

Свидетельство Госкомитета  
По информационной политике Украины  
КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

**КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**Председатель**

Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

**Секретарь координационного совета**

К.А. Горбунов, канд. техн. наук

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.

Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.

Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.

Л.М. Бесов, д-р техн. наук, проф.

А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.

М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.

В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.

И.Ф. Домнин, д-р техн. наук, проф.

В.В. Епифанов, канд. техн. наук, проф.

Ю.И. Зайцев, канд. техн. наук, проф.

П.А. Качанов, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.

С.И. Кондрашев, д-р техн. наук, проф.

В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.

В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

Г.В. Лисачук, д-р техн. наук, проф.

В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф.

О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.

В.И. Николаенко, канд. ист. наук, проф.

В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Ответственный редактор**

М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.

**Ответственный секретарь**

Г.Н. Шабанова, д-р техн. наук, проф.

В.Л. Авраменко, канд. техн. наук, проф.

Б.И. Байрачный, д-р техн. наук, проф.

Л.Л. Брагина, д-р техн. наук, проф.

Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.

Г.И. Гринь, д-р техн. наук, проф.

И.Н. Демидов, д-р техн. наук, проф.

А.М. Карапеев, д-р хим. наук, проф.

Н.Ф. Клещев, д-р техн. наук, проф.

А.Я. Лобойко, д-р техн. наук, проф.

А.П. Мельник, д-р техн. наук, проф.

А.С. Савенков, д-р техн. наук, проф.

Г.Д. Семченко, д-р техн. наук, проф.

С.А. Слободской, д-р техн. наук, проф.

Р.Д. Сытник, д-р техн. наук, проф.

Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

В.И. Тошинский, д-р техн. наук, проф.

В.П. Шапорев, д-р техн. наук, проф.

**АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ**

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ»

Кафедра керамики

Тел. (057) 707-60-51

e-mail: szelentcov@kpi.kharkov.ua

**Харьков 2011**

УДК 621.833

**Вісник Національного технічного університету “Харківський полі-технічний інститут”.** Збірник наукових праць. Тематичний випуск “Хімія, хімічна технологія та екологія”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2011. – № 50. – 179 с.

У збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками, спеціалістами різних організацій та підприємств.

Для наукових співробітників, викладачів, аспірантів, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты научных исследований и разработок, которые выполнены преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками, специалистами различных организаций и предприятий.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, специалистов.

**Друкується за рішенням Вченої ради НТУ “ХПІ”,  
протокол № 10 від 01.11. 2011 р.**

ISSN 2079-0821

© Національний технічний університет «ХПІ», 2011

**П.И. ПИЛОВ**, докт. техн. наук, проректор, НГУ, Днепропетровск,  
**Л.Ж. ГОРОБЕЦ**, докт. техн. наук, проф., НГУ, Днепропетровск,  
**Н.С. ПРЯДКО**, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудн.,  
ИТМ НАН Украины, Днепропетровск,  
**Л.А. ЦЫБУЛЬКО**, канд. техн. наук, доц., НГУ, Днепропетровск,  
**И.В. ВЕРХОРОБИНА**, инж., ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск

## **АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РАБОТЫ СТРУЙНЫХ МЕЛЬНИЦ РАЗЛИЧНОГО ТИПОРАЗМЕРА**

Встановлено закономірності акустичного моніторингу процесу струминного подрібнення твердих сипучих матеріалів в установках різного типорозміру.

Установлены закономерности акустического мониторинга процесса струйного измельчения твердых сыпучих материалов в установках разного типоразмера.

Acoustic monitoring laws of jet grinding process of firm loose materials in various size mills are established.

**Постановка проблемы.** Для тонкого измельчения и механоактивации тонкодисперсных редкометальных концентратов, сырьевых материалов в производстве стекловолокна и строительной керамики нашли применение установки струйного измельчения [1, 2]. В области получения тонкодисперсных порошков по-прежнему актуален вопрос повышения эффективности процесса. Согласно развивающейся теории тонкого измельчения высокие эффекты диспергирования достигаются путем увеличения плотности энергии при разрушении измельчаемых частиц [3 – 5]. Рекомендуется повышение скорости  $\dot{\varepsilon}$  относительной динамической деформации материала при разрушении ( $\dot{\varepsilon} = V/d$ , где  $V$  – скорость удара,  $d$  – размер нагружаемого тела), в частности, при струйном измельчении – высокодинамичное импульсное нагружение частиц ударами или истиранием в противоточных или вихревых потоках энергоносителя.

В установках струйного измельчения достигается высокий уровень дисперсности (1 – 10 мкм) порошков с удельной поверхностью порядка 0,5 – 2 м<sup>2</sup>/г. Измельчение в струях осуществляется без ограничений на твердость, структурные и физико-механические свойства материалов. Опыт про-

мышленной эксплуатации газоструйных мельниц показал наиболее высокую эффективность применения нагретого энергоносителя при измельчении цирконового концентрата в условиях Вольногорского ГМК и шлака на Волгоградском керамическом заводе [6].

К режимным параметрам струйного измельчения относятся: концентрация твердой фазы в струе, скорость ударов и размеры частиц, ускоренных струями. Как показали исследования, режим загрузки струй при прочих равных условиях (дисперсность продукта, параметры энергоносителя, режим классификации) определяет концентрацию и скорость частиц твердой фазы, что влияет на уровень производительности мельницы и соответственно эффективность измельчения. Поддержание оптимального содержания твердой фазы в струях в процессе работы мельницы предполагается реализовать путем непрерывного контроля акустической активности зоны помола и управления загрузкой измельчаемого материала.

Как показано в работах [3, 7], существует корреляционная связь количества мелких и тонких фракций (менее 100 – 400 мкм), образованных при разрушении сжатием модельных образцов горных пород, от удельного счета акустических сигналов (АС). Образование и рост размеров трещин в зонах дробления и измельчения нагружаемого образца сопровождаются изменением амплитуд сигналов акустической эмиссии (АЭ). При переходе от начала нагружения к разрушению характерная амплитуда сигналов АЭ может увеличиваться от десятков милливольт до единиц вольта.

Исследование кинетики струйного измельчения также возможно с применением акустического мониторинга зоны помола. Акустическое излучение контролируется счетом сигналов (АС), значениями амплитуд и активностью  $\dot{N}(\tau)$  акустической эмиссии ( $\dot{N}$  – активность, АЭ – число сигналов в единицу времени). Изменение плотности потока частиц в струях, от которой зависит вероятность столкновений частиц в зоне помола, сопровождается изменением активности  $\dot{N}$  акустического излучения этой зоны. Повышение уровня акустической активности зоны помола на любой стадии является положительным фактором процесса измельчения, поскольку выход мелких фракций при прочих равных условиях (крупности частиц, скорости удара, параметрах энергоносителя) прямо пропорционален числу соударений частиц. Для материалов с различной измельчаемостью (шамот, шлак, уголь) оптимальный диапазон акустической активности зоны струйного помола в области эффективного измельчения составляет  $\dot{N} = 10^{3,5} – 10^{5,3}$  [8].

Результаты работ [8, 9] показали, что управление процессом струйного измельчения должно исходить из информации, предоставляемой акустическим мониторингом о размерах частиц и состоянии загрузки струй, а затем на основе анализа полученной информации - обеспечить своевременную подачу порций материала для достижения максимальной эффективности процесса измельчения.

Целью данной статьи является установление закономерностей акустического мониторинга работы струйной мельницы. Для этой цели проведен анализ результатов исследований струйных мельниц нескольких типоразмеров: УСИ-02, УСИ-20, УСИ-1000 с различной производительностью (от 0,2 – 20 до 1000 кг/ч).

**Основное содержание исследований.** Измельчали порошки не крупнее 2,5 мм различной плотности и твердости: кварцевый песок, цирконовый концентрат, металлургический шлак, шамот, уголь. В режимах измельчения изменяли давление энергоносителя, частоту вращения ротора классификатора, степень загрузки струй материалом. Определение дисперсности готового продукта проведено путем определения величины  $S_{уд}$  удельной поверхности на приборах Т-3 В.В. Товарова и фирмы «MALVERN» [10]. Измерение акустических параметров в зоне помола осуществлялось с помощью широкополосного апериодического датчика, смонтированного на торце латунного волновода. Другой конец волновода размещался внутри помольной камеры мельницы. Датчик соединяли с аналого-цифровым преобразователем акустических сигналов и компьютером. Время регистрации АС при частоте 400 кГц составляло 0,1с, интервал измерения – 10 – 60 с. При определении амплитудных распределений АС некоторое минимальное значение амплитуды (менее 5 мВ) принималось за нулевой уровень отсчета величины амплитуды за период измерения.

Исследования работы мельниц различных типоразмеров показали, что в акустическом мониторинге наиболее важную информацию о процессе измельчения содержит изменение скорости счета  $\dot{N}$  акустической активности зоны помола, а также распределения амплитуд по величине с определением их количества для характерного значения (максимального или минимального). Изменение размеров частиц в процессе струйного измельчения приводит к изменению величины амплитуд сигналов АЭ при соударениях частиц с волноводом.

На рис. 1 рассмотрена кинетика значений амплитуды АС при измельчении в

струйной мельнице УСИ-20 лабораторного типа ( $2 - 20$  кг/ч) различных твердых материалов: известняка, шамота, угля крупностью менее 2,5 мм. Исследование проводилось при частоте  $n = 2000$  мин $^{-1}$  на различных стадиях загрузки струй материалом (загрузка, рабочий режим, разгрузка). Видно, что изменение режима загрузки струй обусловливает изменение размеров частиц и соответственно амплитудного распределения акустических сигналов. Переход амплитудного распределения АС в область меньших значений амплитуд характеризует начало разгрузки струй в результате завершения измельчения и удаления кондиционной фракции в циклон-пылеосадитель.

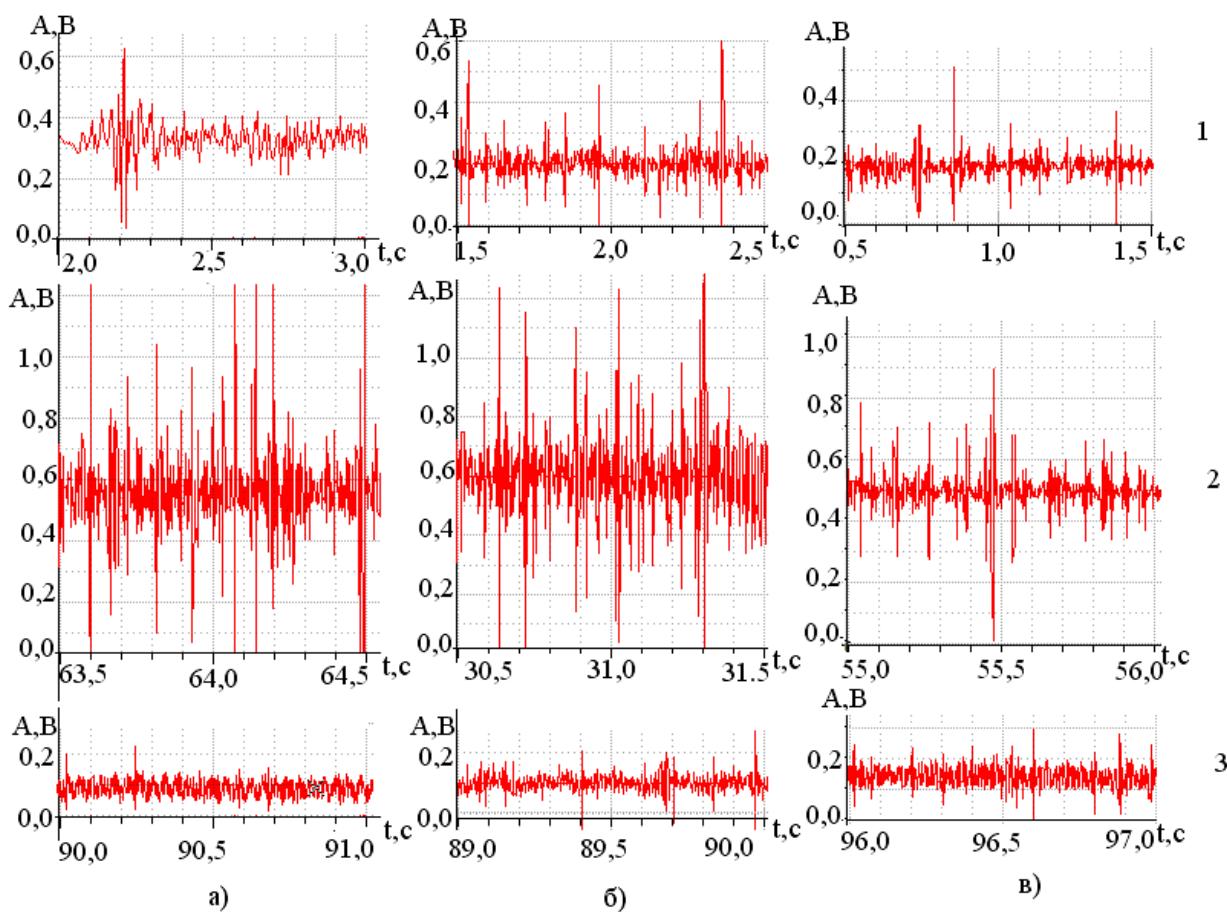


Рис. 1. Записи кинетики амплитуд АС при струйном измельчении в УСИ-20 известняка (а), шамота (б), угля (в) в различных состояниях струй:

1 – при загрузке материала, 2 – в рабочем режиме, 3 – при разгрузке струй;

$$n = 2000 \text{мин}^{-1}, P = 0,3 \text{ МПа}$$

На рис. 2 показано увеличение амплитуды АС с крупностью  $d$  измельчаемых частиц в начале измельчения (первые секунды). Видно, что степень зависимости  $\lg A$  ( $\lg d$ ) влияет плотность материала (в диапазоне  $1,4 - 4,7$  г/см $^3$ ): причем, чем выше плотность вещества, тем больше амплитуда  $A_{\max}$  при прочих рав-

ных условиях. Это влияние усиливается при крупности частиц выше 0,2 мм. Исследования показали, что по мере разгрузки струй с течением процесса измельчения размеры частиц уменьшаются, возрастает величина их удельной поверхности, что сопровождается закономерным уменьшением максимальных значений амплитуд и роста счета малоамплитудных сигналов (менее 0,2 В) в спектрах акустического излучения зоны помола.

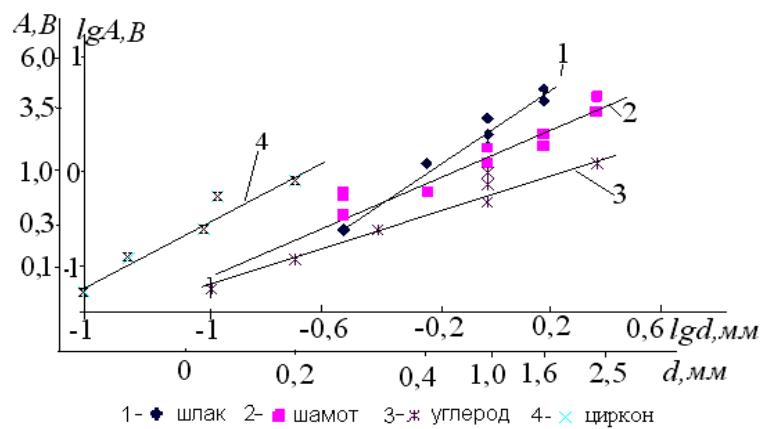


Рис. 2. Влияние размера измельчаемых частиц на величину амплитуд АС в рабочей зоне в первые секунды ( $\tau = 1 - 3$  с) струйного измельчения.

Проявляется закономерность накопления АС (с 30 – 50 до 80 – 90 %) минимальной амплитуды (для циркона – менее 5 мВ) к моменту завершения измельчения и разгрузки струй. С получением такой информации о начале разгрузки струй для продолжения измельчения необходимо производить дозагрузку новой порции материала.

На рис. 3 показано изменение акустической активности  $\dot{N}$  зон помола для установок различного типоразмера с изменением диапазона малоамплитудных сигналов. Проявляется закономерность накопления АС (с 30 – 50 до 80 – 90 %) минимальной амплитуды (для циркона – менее 5 мВ) к моменту завершения измельчения и разгрузки струй.

На рис. 4 сопоставлены амплитудные распределения АС зоны помола промышленной струйной мельницы с гранулометрическими распределениями частиц исходного материала и измельченного продукта в различных режимах измельчения цирконового концентрата.

Анализ графиков позволяет сделать вывод об уменьшении преимущественных значений амплитуд (графики 4 б) с повышением частоты п вращения ротора классификатора. Увеличение давления энергоносителя (сжатого воздуха) сопровождается ростом максимальных значений  $A_{\max}$  амплитуд АС

(графики 4 в).

На рис. 5 показано влияние дисперсности измельченного продукта на максимальные значения  $A_{\max}$  амплитуд АС в состоянии разгрузки струй в диапазоне удельной поверхности продукта циклона  $S_{уд} = 1000 - 20000 \text{ см}^2/\text{г}$ . В число  $A_{\max}$  вошли АС наибольших значений амплитуд с долей 10 – 15 %.

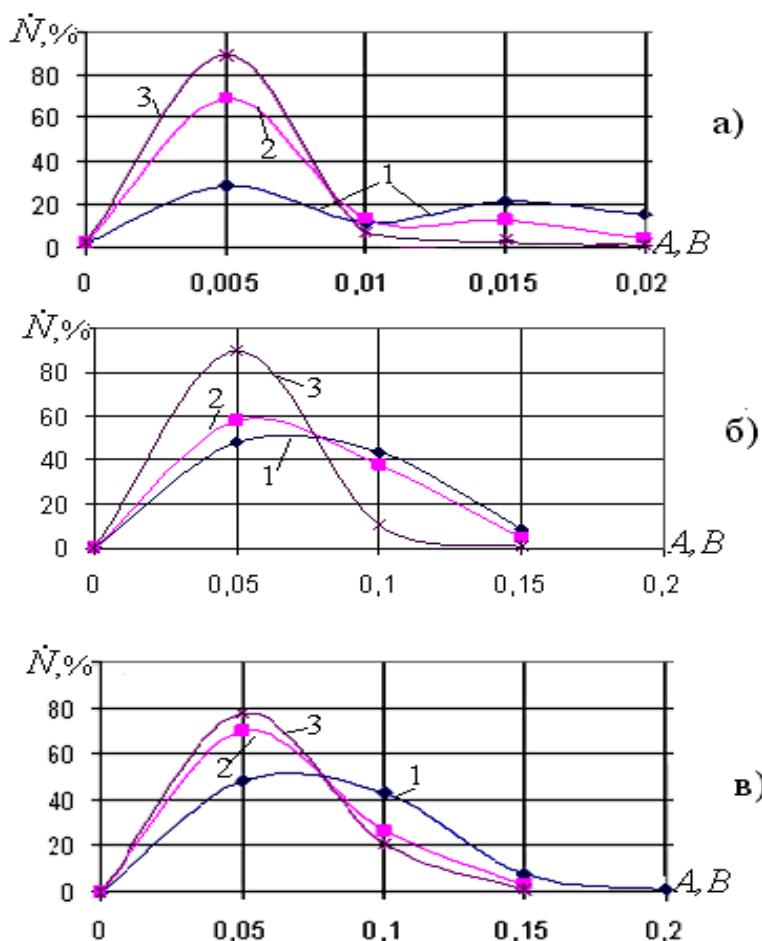


Рис. 3. Распределение акустической активности  $\dot{N}$  зоны помола по величине амплитуд на различных стадиях измельчения циркона в установках лабораторного (УСИ-20, УСИ-0,2) и промышленного (УСИ-1000) типоразмера:

а) УСИ-20 –  $S_{уд} = 2730 \text{ см}^2/\text{г}$ ,  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P = 0,3 \text{ МПа}$ ,

б) УСИ-02 –  $S_{уд} = 5856 \text{ см}^2/\text{г}$ ,  $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P = 0,3 \text{ МПа}$ ,

в) УСИ-1000 –  $S_{уд} = 2375 \text{ см}^2/\text{г}$ ,  $n = 180 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P = 0,6 \text{ МПа}$ ;

1 – загрузка струй, 2 – рабочий режим, 3 – разгрузка струй

Полагаем, что распределение амплитуд АС на стадии загрузки может служить характеристикой крупности исходного материала, тогда как параметр  $A_{\max}$  на стадии разгрузки струй может служить оценкой характерных размеров частиц циркулирующей нагрузки мельницы (возврата некондици-

онных частиц из классификатора в инжекторы).

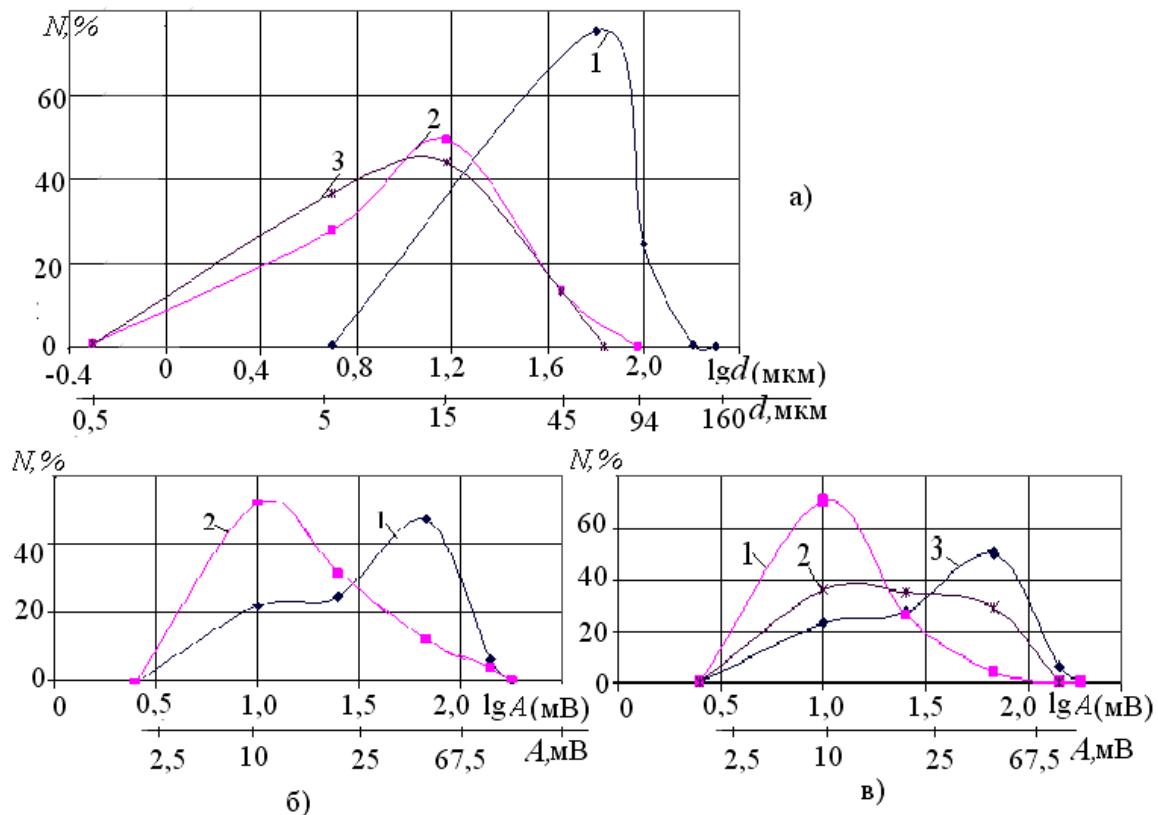


Рис. 4. Гранулометрическое распределение  $N = f(\lg d)$  частиц (а) и амплитудные распределения АС зоны помола  $N = f(\lg A)$  (б, с) в различных режимах струйного измельчения цирконового концентрата в УСИ-1000:

- a) 1 – исходный материал, 2 – измельченный продукт,  $n = 84 \text{ мин}^{-1}$ ,
- 3 – измельченный продукт,  $n = 180 \text{ мин}^{-1}$ ;
- b) 1 –  $n = 84 \text{ мин}^{-1}$ , 2 –  $n = 180 \text{ мин}^{-1}$ ;
- c) 1 –  $P = 0,3 \text{ МПа}$ , 2 –  $P = 0,4 \text{ МПа}$ ,  $P = 0,6 \text{ МПа}$ ,  $n = 84 \text{ мин}^{-1}$ .

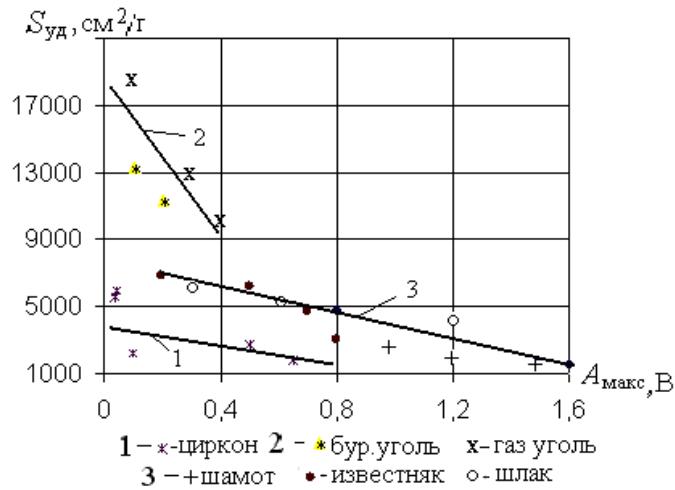


Рис. 5. Изменения максимальных значений  $A_{\max}$  амплитуд АС с повышением дисперсности  $S_{\text{уд}}$  измельчаемых частиц (на стадии разгрузки струй)

## **Выводы.**

Применение акустического мониторинга процесса струйного измельчения позволяет получить информацию для прогнозной оценки количества и качества измельченного продукта в условиях измельчительной установки любого типо-размера. В этой связи важны зависимости кинетики акустической активности и распределений амплитуд акустических сигналов в зоне помола. Установленные закономерности акустического мониторинга процесса струйного измельчения могут составить основу информационной акустической диагностики работы струйных мельниц различного типоразмера для поддержания их эффективной работы путем компьютерной обработки акустической информации и управления загрузкой струй материалом.

**Список литературы:** 1. Пилов П.И. Производство тонкодисперсных материалов в установках струйного измельчения / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина и др.] // Тонкоизмельченные и ультрадисперсные материалы в промышленности (производство и применение): 1-я междунар. научн.-практ. конф.: материалы конф. – С-Пб.: "ИВА", 2003. – С. 18 – 22. 2. Пилов П.И. Технологические возможности струйных измельчителей / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина // ГИАБ. – 2007. – № 3. – С. 359 – 367. 3. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дис... доктора техн. наук: 05.15.08 / Л.Ж. Горобец. – Днепропетровск, 2004. – 36 с. 4. Пилов П.И. Анализ функционирования геотехнических систем с позиций закономерностей микроразрушения / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец // Горный журнал. – 2009. – № 5. – С. 29 – 34. 5. 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. 6. Пилов П.И. Параметры акустического излучения промышленной газо-струйной установки / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др.] // Вестник НТУ«ХПИ». – 2007. – № 27. – С. 33 – 41. 7. 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. 8. Pilov P.I. // Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process / P.I. Pilov, L.ZH. Gorobets, N.S. Pryadko // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 54, № 4. – P. 841 – 848. 9. Pilov P.I. An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles / P.I. Pilov, L.J. Gorobets, V.N. Bovenko // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 6. – С. 23 – 26. 10. Горобец Л.Ж. Характеристики дисперсности продуктов струйного измельчения / [Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, В.П. Краснопер и др.] // ЗКК. – 2010. – № 41 – 42. – С. 111 – 121.

*Поступила в редакцию 17.06.11*

**Д.А. СТРАТИЙЧУК**, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудн.;

**А.Н. КАТРУША**, канд. техн. наук, научн. сотрудн.;

**И.П. ФЕСЕНКО**, докт. техн. наук, ст. научн. сотрудн.;

**Т.И. СМИРНОВА**, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудн.,

ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев

## **ІЗУЧЕННЯ НІЗКОЕНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДІСПЕРГИРОВАННЯ AlN, КАК СРЕДЫ, ПЕРЕДАЮЩЕЙ ДАВЛЕНИЕ ПРИ ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ**

В роботі розглянуто процеси подрібнення мікропорошку AlN шляхом диспергування твердосплавними шарами в низькоенергетичному активаторі без використання рідких середовищ. Згідно даних гранулометричного аналізу та SEM мікроскопії простежено залежність середнього розміру частинок та їх морфології від тривалості диспергування. Також, на кінцевій стадії диспергування була приготовлена суміш AlN/графіт, використання якої дозволило провести термобаричну обробку алмазних кристалів з метою покращення їх фізичних характеристик.

В работе рассмотрены процессы измельчения микропорошка AlN путём диспергирования твёрдо-сплавными шарами в низко-энергетическом активаторе без использования жидких сред. Согласно данных гранулометрического анализа и SEM микроскопии, изучена зависимость среднего размера частиц и их морфологии от продолжительности диспергирования. Также, на конечной стадии диспергирования была приготовлена смесь AlN/графит, использование которой позволило провести термобарическую обработку алмазных кристаллов с целью улучшения их физических характеристик.

The processes of grinding of AlN micropowder by its dispersing with carbide balls in the low-energy activator without fluids was discussed in the paper. According to data of the particles size analysis and SEM microscopy, the dependence of the average particle size and their morphology on the duration of grinding was determined. A mixture of AlN/graphite was prepared at the final stage of the dispergation. This mixture use allows to perform thermobaric treatment of diamond crystals in order to improve their physical characteristics.

Для изготовления композиционных материалов из тугоплавких соединений важное значение имеет приготовление гомогенных смесей, что в конечном итоге обеспечивает изотропность свойств получаемых изделий [1, 2].

Основная масса карбидных, нитридных и боридных порошков производится карботермическим или иным высокотемпературным способом [3, 4], а конечный продукт зачастую представлен грубоагломератным составом.

Данное исследование является частью научно-поисковой работы по выбору оптимальной среды, передающей давление, для использования в технологии термобарической обработки монокристаллов синтетического алмаза.

Разработанная методика обработки предполагает одновременное воздействие на монокристаллы высокого давления до 10 ГПа и температуры до 2400 °С с целью создания и трансформации в них примесных центров окраски. В связи с высокой стоимостью некоторых объектов такой обработки удачный выбор среды контактирования с поверхностью алмаза определяет в конечном счёте продуктивность и общую себестоимость всей технологии за счет исключения случаев разрушения монокристаллов при обработке. Нитрид алюминия ввиду своей высокой термостойкости, химической инертности по отношению к углероду, а также высоких упругих модулей является универсальным исходным материалом при работе с алмазным сырьём. В представленной работе рассмотрены процессы измельчения порошка нитрида алюминия в низкоскоростном смесителе с целью получения однородной по гранулометрическому составу смеси AlN/графит. В качестве исходного материала был выбран порошок AlN с средним размером частиц 47 мкм. Гранулометрические исследования порошков AlN проводили с помощью установки LMS-30 (SEISHIN ENTERPRISE, Япония).

Установка LMS-30 проводит анализ распределения частиц по размерам на основе дифракции и рассеяния излучения лазера, что позволяет измерять частицы размером от 0,1 до 1000 мкм. Для калибровки установки применяли эталонную пластину PPGP (Particle Pattern Glass Plate), благодаря чему получили результаты, близкие к абсолютному значению размера частиц. Для диспергирования пробы порошка использовали ультразвуковой осциллятор.

Электронномикроскопические исследования проводились на микроскопе фирмы Zeiss.

Типичное SEM- изображение исходного AlN приведено на рис. 1.

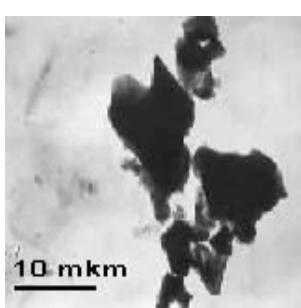


Рис. 1. SEM изображение исходного AlN

Процесс размола осуществлялся в цилиндрическом смесителе объёмом 5000 мл, стенки которого изготовлены из высококачественной легированной стали на основе никелевых и титановых сплавов. Размольными телами служили твёрдо-сплавные шары (ВК6), средний размер которых составлял 12 мм.

Размол осуществляли без использование жид-

ких сред в атмосфере воздуха, соотношение порошок/размольное тело было выбрано 1/3. Время размола составляло от 1 до 12 часов, в промежутках которого периодически изымались пробы для анализа.

Перед проведением исследований в смесителе была предварительно размолота нулевая партия AlN с целью шаржирования стенок барабана и размольных тел, что позволило снизить количество намола при проведении экспериментов.

На рис. 2 и рис. 3 показано данные гранулометрического состава в зависимости от времени размола.

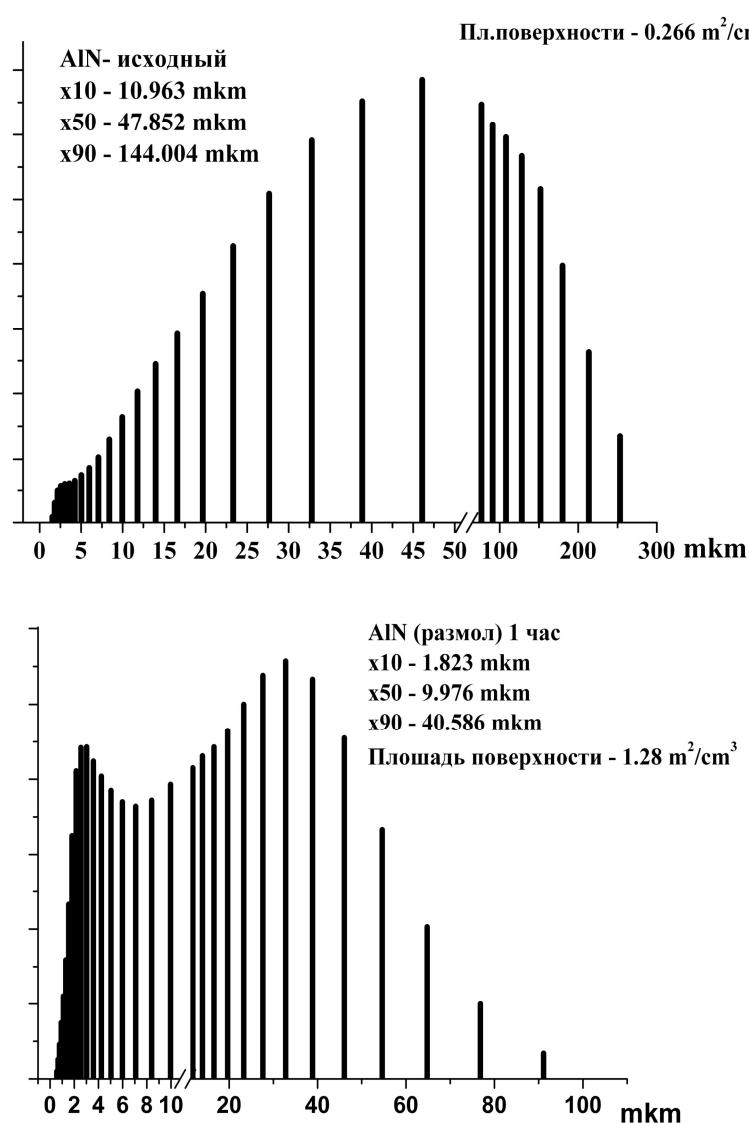


Рис. 2. Зависимость гранулометрического состава от времени размола

Анализируя полученные данные, видно, что количество крупной фракции резко уменьшается уже при первом часе размола, а средний размер частиц снижается в пять раз.

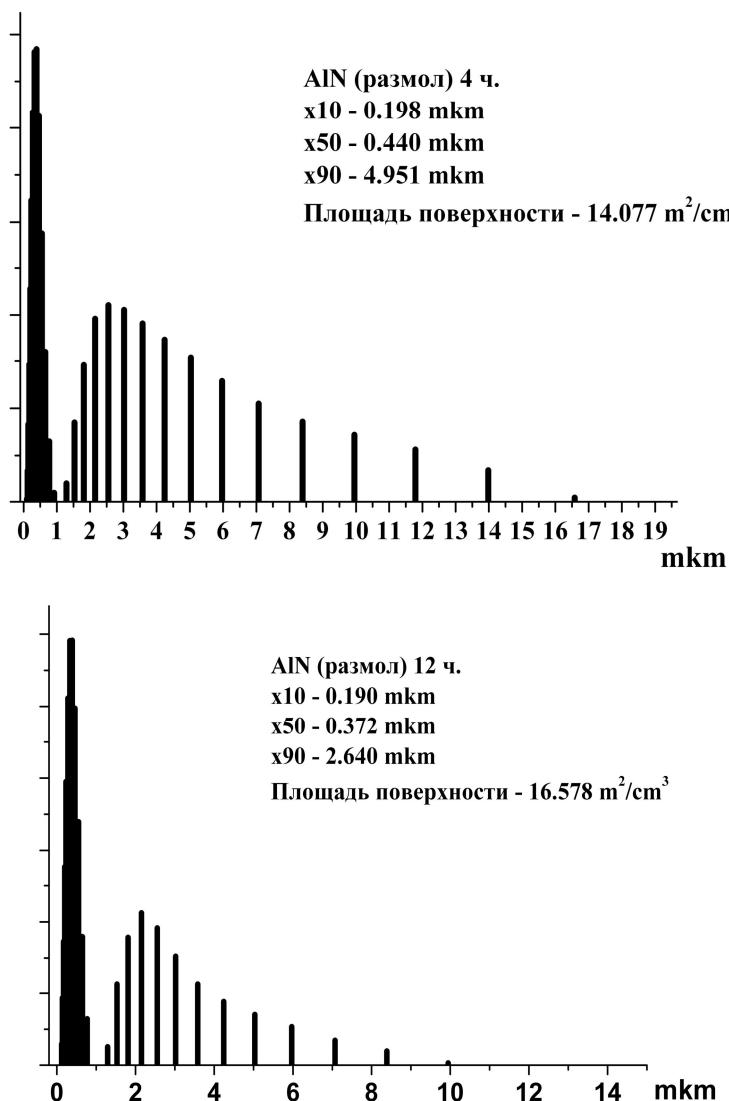


Рис. 3. Зависимость гранулометрического состава от времени размоля

В дальнейшем происходит выравнивание гранулометрического состава, что свидетельствует о стадии насыщения системы.

На рис. 4 (а) показаны зависимости среднего размера частиц и поверхности от времени размоля.

Как видно из графиков, стабилизация системы происходит на 3-м часу размоля и дальнейшее диспергирование лишено экономической целесообразности.

Используя энергодисперсионную насадку при анализе морфологии поверхности, был также проведён элементный анализ исходного AlN и последующих размольных проб.

На рис. 4 (б) показана зависимость содержания Si, Fe, W в отобранных порошках.

Как видно из зависимостей, период насыщения для данной системы

продолжается до 4-х часов, достигая максимума для вольфрама на уровне 0,54 масс. %.

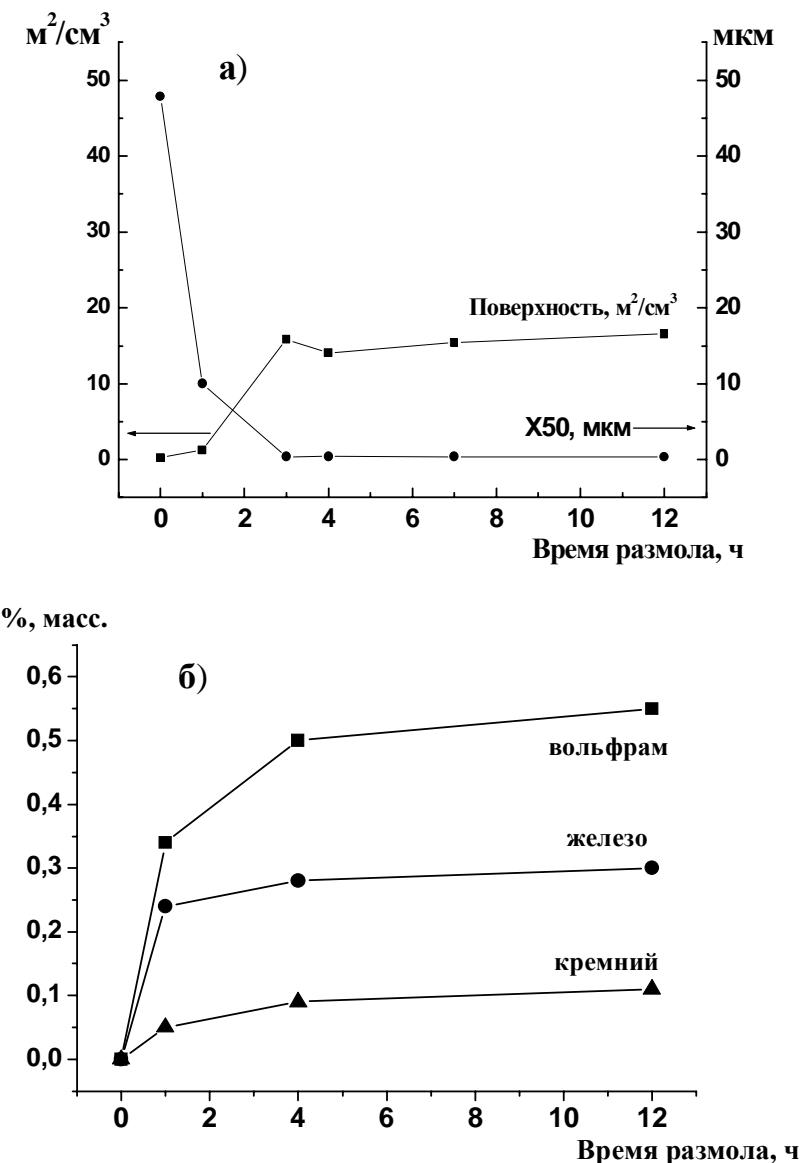


Рис. 4. Зависимость среднего размера частиц ( $\times 50$ ), площади поверхности и примесей намола от времени диспергирования

Полученные таким образом данные хорошо согласуются с результатами гранулометрических исследований, показывая, что процессы активного размола происходят на протяжении первых 3 – 4-х часов.

Общая энергонасыщенность системы составляла 2,5 Вт на 1 г AlN.

Также было проведено изучение морфологии частиц нитрида алюминия в зависимости от времени диспергирования.

На рис. 5 показаны микрофотографии порошковых проб: исходного AlN

(а), после 20 мин (б), 1 часа (в) и 4-х часов (г) размола.

Как видно из представленных изображений, на первых стадиях происходит размельчение крупных агрегатов с появлением мелкой составляющей, количество которой стремительно увеличивается.

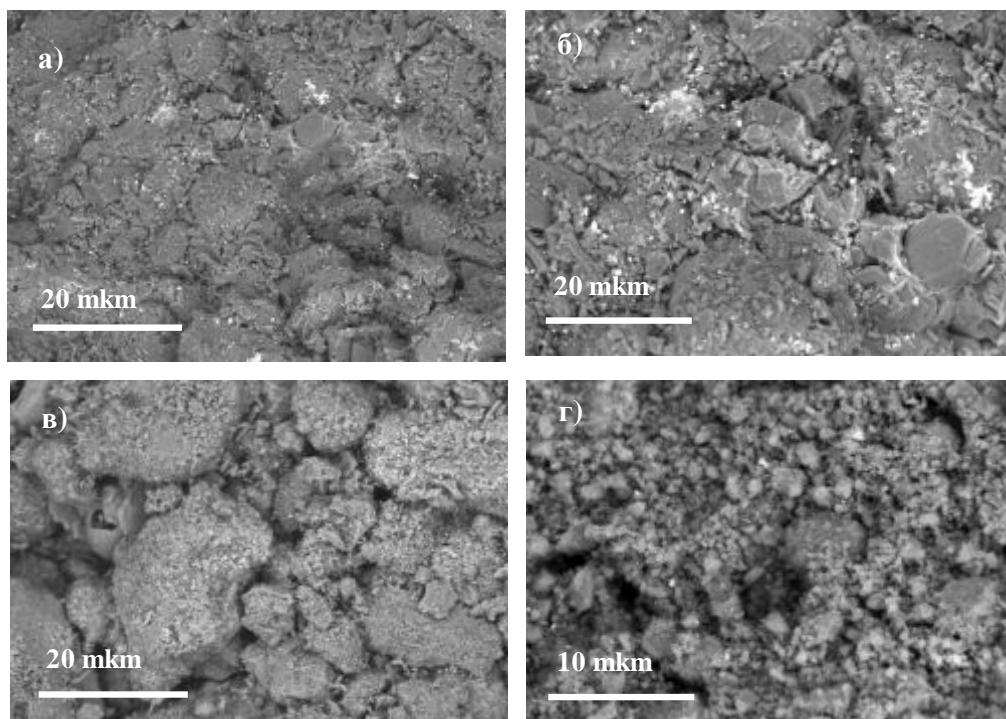


Рис. 5. SEM-изображение порошка AlN после размола:  
а) исходный, б) после 20 мин., в) 1 ч и г) 4 ч размола.

В конечном продукте (когда система достигает дисперсионного максимума) практически отсутствуют крупные агломераты.

Следует отметить хорошую согласованность двух методов исследования: гранулометрию посредством рассеивания лазерного луча и непосредственного наблюдения за размерами частиц при большом увеличении.

Также меняется внешняя форма частиц от остроугловой исходной (рис. 1) к скоплению мелкозернистых агломератов продолговатой и сферической формы.

Всё это позволяет получить исходный порошок, который не содержит множество остроугловых форм, способных повредить поверхности алмазных кристаллов.

Следует отметить, что другие способы размола, а именно высокоэнергетические в планетарном активаторе, не позволяют достичь таких особенностей внешней морфологии.

В дальнейшем, в полученную смесь, после 4-х часов размола, добавлялось определённое количество чешуйчатого графита (ГСМ-1) и дополнительным 3-х часовым смещиванием была получена гомогенная AlN/графит смесь.

Проводя дополнительные электронномикроскопические исследования, было показано, что средний размер частиц AlN после добавления графита не претерпевает изменений, а в результате размола происходит только интенсивное смещивание и распределение мягкой графитовой фазы среди высоко-модульного AlN.

Таким образом, проведя низкоэнергетический размол в стальном смесителе, используя твёрдосплавные размольные тела, была получена токопроводящая резистивная смесь AlN/графит, в которой мелкие частички нитрида алюминия равномерно распределены в графитовой пластичной матрице.

Эта смесь была использована в качестве среды, передающей давление и непосредственно контактирующей с алмазными кристаллами.

В результаты проведения термобарической обработки монокристаллов алмаза в такой среде установлено, что при заданных параметрах обработки ( $p = 10$  ГПа и  $T = 2300$  °C) поверхностной графитизации не возникает, разрушения кристаллов не зафиксировано.

**Список литературы:** 1. Бальшин М.Ю. Основы порошковой металлургии / М.Ю. Бальшин, С.С. Кипарисов. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с. 2. Елютин В.П. Высокотемпературные материалы / [В.П. Елютин, В.Н. Костиков, Б.С. Лысов и др.]. – М.; Л.: Наука, 1973. – 464 с. 3. Кислый П.С. Спекание тугоплавких соединений / П.С. Кислый, М.А. Кузенкова. – К.: Наук. думка , 1980. – 167 с. 4. Гнесин Г.Г. Бескислородные керамические материалы / Г.Г. Гнесин. – К.: Техника, 1987. – 151 с.

*Поступила в редакцию 21.06.11*

***M.O. КАРЧЕВСЬКА***, асистент, КНТУ, Кіровоград

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗАВАНТАЖЕННЯ КУЛЬОВОГО МЛИНА РУДОЮ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛУ**

Приведені результати дослідження первинного перетворювача завантаження кульового млина рудою за енергетичними параметрами руйнування матеріалу, який включає дві перетворюальні системи. Показано, що первинний перетворювач необхідно виконувати у вигляді системи «стержень – пружна пластина». Отримані математичні вирази, що встановлюють зв'язок між переміщенням центральної частини пружної пластини і її коефіцієнтом жорсткості, масою кулі, масою стержня та об'ємом подрібнюваної руди. Приведені умови ефективного використання куль і результати впливу зношення стержнів на показання пристрою та досягнення інваріантності від дії цього фактору.

Приведены результаты исследования первичного преобразователя загрузки пулевой мельницы рудой за энергетическими параметрами разрушения материала, который включает две превращающиеся системы. Показано, что первичного преобразователя необходимо выполнять в виде системы «стержень – упругая пластина». Получены математические выражения, которые устанавливают связь между перемещением центральной части упругой пластины и ее коэффициентом жесткости, массой пули, массой стержня и объемом измельчаемой руды. Приведены условия эффективного использования пуль и результаты влияния износа стержней на показание устройству и достижение инвариантности от действия этого фактора.

Given results of research of primary transformer of load of bullet mill by ore after the power parameters of destruction of material which includes two convertings systems. It is rotined that a primary transformer must be executed as a system «a bar is a resilient plate». Mathematical expressions, which establish a connection between moving of central part of resilient plate and its coefficient of inflexibility, mass of bullet, mass of bar and by volume of ground down ore, are got. The resulted terms of the effective use of bullets and results of influence of wear of bars are on a testimony a device and achievement of invariance from the action of this factor.

**Вступ.** Все більша кількість залізних руд в теперішній час потребує збагачення, яке, в свою чергу, передбачає їх подрібнення. Подрібнення, яке здійснюють переважно в кульових млинах, зв'язане майже з 50 % всіх енергетичних витрат підприємств і поглинає велику кількість куль і футерівки. Реалізація Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі» безпосередньо зв'язана з процесами подрібнення бідних залізних руд при збагаченні. Нау-

ково-дослідна робота «Комп'ютеризована система ідентифікації завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди» (0109U007939), яка є складовою частиною тематичного плану Кіровоградського національного технічного університету, слугує конкретною задачею в здійсненні вказаної програми. Максимальну продуктивність по готовому продукту і найменші матеріальні та енергетичні витрати можливо отримати лише при певному завантаженні кульового млина рудою. Оскільки відомі пристрої непрямого контролю не можуть забезпечити оптимальне завантаження технологічних агрегатів рудою, необхідно здійснювати пошук засобів, які основані на енергетичній ефективності процесу руйнування твердого [1]. Автором у складі наукового колективу обґрунтовано такий підхід визначення завантаження кульового млина рудою [2, 3], однак раціональну конструкцію первинного перетворювача, його аналітичний опис, питання взаємодії кулі з стержнем, впливу спрацювання стержня на показання пристрою ніхто не розробляв. Зважаючи на важливість вказаних задач і необхідність створення такого засобу, тема статті є актуальною.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є підвищення точності і показності інформації перетворювача завантаження кульового млина рудою. Поставлена мета досягається в результаті теоретичного дослідження первинних перетворювачів, взаємодії кулі з стержнем, впливу спрацювання стержня на вихідну величину пристрою.

**Результати.** Проведені дослідження показали, що первинний перетворювач завантаження кульового млина рудою за енергетичними параметрами руйнування матеріалу повинен містити циліндричний стержень, який взаємодіє з падаючими кулями і передає зусилля на пружну пластину – чутливий елемент. Для переміщення центральної частини пружної пластини при ударі кулі по торцю стержня отримана залежність:

$$x_n = \frac{m_k g \left[ 1 + \left( \frac{m_c - m_k}{m_k + m_c} \right)^2 \right]}{c_{\Pi}} + \sqrt{\frac{m_k^2 g^2 \left[ 1 + \left( \frac{m_c - m_k}{m_k + m_c} \right)^2 \right]^2 + 2c_{\Pi} \left\{ m_k g h \left[ 1 + \left( \frac{m_c - m_k}{m_k + m_c} \right)^2 \right] - k k_1 V_p \right\}}{c_{\Pi}}}, \quad (1)$$

де  $c_P$  – коефіцієнт жорсткості пружної пластини;  $m_k$ ,  $m_c$  – маса кулі і стержня;  $g$  – прискорення земного тяжіння;  $h$  – висота, з якої падає куля;  $k$  – коефіцієнт пропорціональності, що залежить від міцності руди;  $k_1$  – стала, що характеризує зв'язок між загальним і деформованим об'ємом шматка руди;  $V_p$  – об'єм шматків руди.

З рівняння (1) видно, що вихідний сигнал перетворювача з твердим при певних  $k_1$  і  $k$  залежить від об'єму руди, що руйнується при падінні кулі. Комп'ютерним моделюванням встановлено, що  $x_P$  лінійно змінюється при зростанні об'єму руди від нуля до можливого найбільшого значення.

Первинний перетворювач працює за умови незмінності маси кулі, що можливо здійснити у кульових млинах. Недопустимість одночасного удару кількох куль по торцю забезпечується вибором діаметра стержня  $d_c$ , який менший порівняно з діаметром кулі  $d_k$ , наприклад  $d_c = 0,8 d_k$ . Аналіз показав, що ефективне використання кулі  $d_k = 50$  мм при руйнуванні твердого 5 мм відповідає діаметру стержня близько 30 мм.

Формула (1) отримана за умови центрального удару кулі по торцю стержня. На рис. 1 показані можливі випадки взаємодії кулі з стержнем при роботі кульового млина. Якщо частину стержня, що взаємодіє з кулею, довжиною 100 мм виконати з діаметром 30 мм, а другу частину довжиною 100 мм виконати діаметром 85 мм, то при відхиленнях точки контакту на  $\pm 15$  мм від осі стержня практично всі удари можна рахувати центральними.

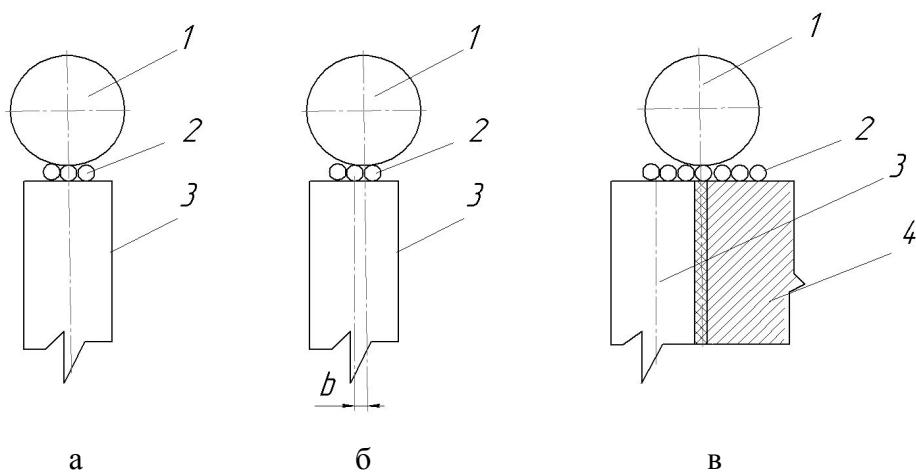


Рис. 1. Взаємодія кулі з стержнем по центру (а), зі зміщенням  $b$  (б), на периферії (в):

1 – куля; 2 – шматки руди; 3 – стержень; 4 – футерівка

З залежності (1) також видно, що на результати вимірювання може

впливати висота, з якої падає куля, або швидкість її руху, якщо вони можуть змінюватися. Використання аналогічного додаткового первинного перетворювача з невеликою площею торця стержня, де не буде затримуватись тверде, дозволяє зустрічним ввімкненням з сигналом основного перетворювача позбавитись такого впливу. Додатковий перетворювач може мати діаметр стержня, що взаємодіє з кулями, який дорівнює 15 мм при інших незмінних параметрах.

В процесі зносу футерівки буде спрацьовуватись і стержень, змінюючи свою масу. Це буде впливати на вихідну величину перетворювача, що характеризується виразом:

$$B = 1 + \left( \frac{m_c - m_\kappa}{m_\kappa + m_c} \right)^2 \quad (2)$$

Залишаючи незмінним діаметр сприймаючого елемента 30 мм, масу стержня  $m_c$  можна змінювати в достатньо широких межах. Як показали дослідження при початковій масі стержня 1 кг і зношенні його до 0,5 кг вихідний сигнал перетворювача змінюється більше, ніж на 11 %. При початковій масі стержня 5,0 кг похибка складе всього 1,76 %, що допустимо для даних умов.

Для встановлення рівня компенсації помилок промоделюємо процес ідентифікації за виразом (1) при прийнятих параметрах перетворювача і значеннях технологічних величин. Дані комп'ютерного моделювання занесено до табл. 1.

Як видно з даних таблиці, у зношенному стані перетворювача прогин пружної пластини зменшується. Перетворювач володіє добрами компенсуючими властивостями.

Ефективно спрацьовують обидва канали компенсації відхилення, оскільки при повному навантаженні рудою похибка ідентифікації менша, ніж відносне відхилення значення відповідно виразу (2) при повному зношенні робочої частини перетворювача.

З ростом завантаження кульового млина похибка збільшується, приймаючи максимальне значення 1,375 %, що менше 1,76 %.

При зношенні стержня показання системи ідентифікації зменшуються, однак при прийнятих параметрах первинного перетворювача відносна похибка в умовах найбільшого завантаження кульового млина складає порівняно незначну величину.

Тому він може з достатньою точністю виконати вимірювання завантаження кульового млина рудою.

Таблиця

Залежність похибки ідентифікації завантаження кульового млина рудою  
від зношення робочого елемента перетворювача масою 5 кг

Об'єм руди, що руйнується, $V_p \times 10^{-6}$ , м <sup>3</sup>	Значення прогину пружної пластини при початковій масі стержня $x_{\text{П}}$ , мм	Значення прогину пружної пластини при кінцевій масі стержня $x_{\text{П}}$ , мм	Відносна похибка прогину пружної пластини, %
0	0,5510	0,5461	-0,890
1	0,5412	0,5363	-0,905
2	0,5312	0,5262	-0,940
3	0,5211	0,5159	-1,000
4	0,5107	0,5055	-1,020
5	0,5002	0,4948	-1,080
6	0,4893	0,4838	-1,124
7	0,4783	0,4727	-1,171
8	0,4670	0,4612	-1,242
9	0,4554	0,4495	-1,296
10	0,4435	0,4374	-1,375

### Висновки.

Таким чином, первинний перетворювач завантаження кульового млина рудою за енергетичними параметрами руйнування матеріалу необхідно виконувати у вигляді системи «стержень – пружна пластина».

При встановленні його в зоні дії куль діаметром 50 мм і максимальної крупності твердого близько 5 мм робочу частину стержня необхідно виконувати діаметром 30 мм, а нижню – діаметром 85 мм.

Додатковий первинний перетворювач повинен мати діаметр стержня в робочій зоні 15 мм. Зустрічне ввімкнення сигналів перетворювачів дозволяє їм працювати при різних незмінних значеннях швидкості руху куль.

Повне зношення робочої частини стержнів приводить до помилки, яка досягає 1,76 % і її найбільше значення діє незначний час, що допустимо для даного технологічного процесу.

Перспективою подальших досліджень в даному напрямі є розробка ефективного вторинного перетворювача і в цілому засобу ідентифікації завантаження кульового млина рудою на основі енергетичних параметрів руйнування матеріалу.

**Список літератури:** 1. Пивняк Г.Г. Измельчение. Енергетика и технология: [учебное пособие для вузов] / [Г.Г. Пивняк, Л.А. Вайсберг, В.И. Кириченко и др.]. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2007. – 296 с. 2. Карчевська М.О. Дослідження руйнування твердого в кульових млинах з метою ідентифікації завантаження / М.О. Карчевська // Вісник НТУ«ХПІ». – 2010. – № 65. – С. 33 – 38. 3. Пат. № 52858 Україна, МПК B02C 25/00. Способ ідентифікації завантаження кульового млина рудою в умовах трифазового руху молотильних тіл / Кондратець В.О., Карчевська М.О.; заявник і патентовласник Кіровогр. нац. техн. ун-т. – № и 2010003611; заявл. 29.03.10; опубл. 10.09.10, Бюл. № 17.

*Надійшла до редколегії 21.06.11*

УДК 546.650 : 544.142.3 : 546.175

**Д.О. СТОРОЖЕНКО**, канд. хім. наук, доц., ПНТУ, Полтава,  
**О.Г. ДРЮЧКО**, канд. хім. наук, доц., ПНТУ, Полтава,  
**I.O. ІВАНИЦЬКА**, канд. хім. наук, доц., ПНТУ, Полтава,  
**Н.В. БУНЯКІНА**, канд. хім. наук, доц., ПНТУ, Полтава

## **ДЕЯКІ ТЕНДЕНЦІЇ СТВОРЕННЯ ОКСИДНИХ РЗЕ-ВМІСНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НІТРАТНИХ СИСТЕМ**

Із застосуванням комплексу фізико-хімічних методів авторами вивчено природу й закономірності хімічної взаємодії, теплових перетворень (25 – 1000 °C) структурних компонентів у системах нітратів рідкісноземельних елементів і елементів IA, IIA груп періодичної системи, амонію. Виявлено низка особливостей і закономірностей у їх сукупній поведінці.

С применением комплекса физико-химических методов авторами изучена природа и закономерности химического взаимодействия, тепловых превращений (25 – 1000 °C) структурных компонентов, в системах нитратов редкоземельных элементов и элементов IA, IIA групп периодической системы, аммонию. Обнаруженный ряд особенностей и закономерностей в их совокупном поведении.

By complex of physical-chemical methods the nature and regularity of chemical interaction and temperature changes (25 – 1000 °C) of structural components in systems nitrate of rare earth elements (REE) and elements of IA, IIA group in periodic system and of ammonia were investigated. A number of peculiarities in their mutual behaviour was found.

Нині продовжується пошук нових методів і комплексних технологій для синтезу спеціальних, функціональних оксидних РЗЕ-вмісних матеріалів із

використанням рідких багатокомпонентних нітратних систем [1 – 15]. Такі технологічні схеми базуються на одержанні дрібнодисперсних порошкових матеріалів хімічною гомогенізацією вихідних компонентів при спільному виділенні продуктів із рідкої фази послідовним чи сумісним осадженням з наступною термообробкою у вигляді їхніх гідроксидів чи інших нерозчинних сполук; використанні іонних і молекулярних координаційних прекурсорів; заміні розчинника; сушинні розпиленням; кріохімічній кристалізації, золь-гель процесах та ін. Синтез нанокристалічних таких матеріалів є складною науково-технологічною проблемою.

Дані дослідження нині направлені на покращення комплексу структурно-чутливих характеристик цільового продукту шляхом оптимізації умов синтезу; вивчення особливостей фрактальної структури, що утворюють наночастинки при виділенні із розчинів, процесів, протікаючих на границях зерен у полікристалічних системах, що визначаються особливостями хімічної взаємодії компонентів системи, нерівноважністю їх протікання; застосування методу «структурного дизайну» для керування електрофізичними властивостями; дослідження самоупорядкування у кристалічних системах; на розробку нових видів матеріалів, (таких як мультифероїків, метаматеріалів та ін.).

Найновітніші дані про результати подібних досліджень далеко нерівноцінні, у ряді випадків вони зумовлені великими експериментальними складнощами, часом носять суперечливий характер і не дають повного уявлення про комплексоутворючу здатність рідкісноземельних елементів у подібних об'єктах. І системне дослідження хімічної взаємодії, фазових рівноваг у водно-сольових системах, розплавах нітратів рідкісноземельних елементів та елементів IA, IIА груп періодичної системи, амонію у повних концентраційних межах і широкому температурному інтервалі, атомно-кристалічної будови та властивостей сполук, що в них утворюються, становлять інтерес при:

- з'ясуванні впливу типу самоупорядкування на властивості як наночастинок, так і полікристалічних матеріалів на їх основі (формування поверхневих фракталів призводить до значної кількості контактів між частинками, низької швидкості фільтрації і відмивання осадів, а при термообробленні вони утворюють «жорсткі» агрегати, що потребують значних механічних зусиль при розмолі; утворення масових фракталів – навпаки, формуванню «м'яких» осадів) [1];
- виявленні у наночастинок незвичайних фізичних і хімічних властиво-

стей, зумовлених проявом так званих «квантоворозмірних ефектів» (коли розміри досліджуваних систем близькі до значення дебройлівських хвиль електронів, фононів чи екситонів). При цьому особливий інтерес мають провідні (електрон, іон), п'єзоелектричні, магнітні матеріали, у яких у найбільшій мірі проявляються відмінності між об'ємними і нанорозмірними об'єктами [2 – 8]. Використання ж наночастинок для синтезу об'ємних зразків нерідко не приводить до бажаного результату. В об'ємній кераміці значний вклад у властивості матеріалів можуть вносити граници зерен, пов'язані з ними бар'єрні ефекти, негативний вплив присутніх проміжних фаз, тощо [4 – 7];

- встановленні чинників, упливаючих на форму частинок, їхню анізотропію (особливо одержанні феромагнітних частинок) [6, 7];
- одержанні й встановленні кристалохімічних закономірностей складних РЗЕ-вмісних систем зі структурою граната, перовскіта; практичній реалізації їх синтезу методом «структурного дизайну» [1, 9] (У кристалічній структурі вказаних систем можна виділити фрагменти з різною будовою, які мають певний порядок уздовж осі третього чи четвертого порядку їхніх субкомірок. При виконанні певних вимог структурної і хімічної сумісності можна вибудувати таку послідовність указаних фрагментів, що в результаті дозволить одержати різні структуру і властивості. Це дозволяє також в межах однієї структури (наприклад, дефектного перовскіта) і близьких хімічних складів цілеспрямовано змінювати властивості матеріалів від іонних провідників до надвисокочастотних (НВЧ) діелектриків і сегнетоелектриків- напівпровідників [12]. Нині такі системи активно вивчаються з метою створення на їх основі високодобротних термостабільних діелектриків для сантиметрового і міліметрового діапазонів хвиль);
- у поглибленні розуміння природи явищ утворення структурних нанодоменів у багатокомпонентних РЗЕ-вмісних ніобатах і нановпорядкування у полікристалічних системах  $Nd_{1/2}Li_{1/2}TiO_3$  у вигляді шахматної структури та з'ясуванню можливості керування властивостями матеріалів, впливаючи на упорядкування на нанорівні [12];
- дослідженнях по створенню текстуреної кераміки та ін.

Комплексом фізиго-хімічних методів авторами вивчені природа й закономірності хімічної взаємодії, теплових перетворень (25 – 1000 °C) структурних компонентів у модельних системах нітратів рідкісноземельних елементів і елементів IA, IIА груп періодичної системи, амонію, компоненти

яких задають технічні характеристики продукту синтезу або використовуються як добавки мінералізаторів чи модифікуючих фізичні властивості.

Хімічний аналіз рідких і твердих фаз, „залишків” проводили на вміст іонів  $\text{Ln}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  –  $\text{Ba}^{2+}$ , азоту. Вміст  $\text{Ln}^{3+}$  визначали трилонометрично;  $\text{Mg}^{2+}$  – об’ємним методом;  $\text{Ca}^{2+}$  –  $\text{Ba}^{2+}$  – комплексонометричним титруванням замісника у фільтраті, звільненого від  $\text{Ln}^{3+}$  аміачним буфером; азоту-методом відгонки; іону  $\text{Me}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  – розрахунком по різниці, виходячи із загального вмісту нітратів і частково за сухим залишком.

У гетерогенних водно-сольових системах із збільшенням енергії активації нагріванням посилюється комплексоутворююча здатність  $\text{Ln}$ . Конкуруючі процеси заміщення молекул  $\text{H}_2\text{O}$  на  $\text{NO}_3^-$ -групи в оточенні  $\text{Ln}^{3+}$  створюють умови до утворення відповідних високосиметричних комплексів. Різні способи їх просторового упакування з іншими структурними елементами у процесі кристалізації призводять до виділення із рідкої фази аніонних координаційних сполук певного складу й структури.

Авторами встановлені кількість, склад, температурні і концентраційні межі кристалізації фаз, що утворюються, характер їх розчинності, побудовані фазові діаграми розчинності систем. Концентраційним межам насичених розчинів, із яких виділяються комплексні нітрати, відповідають склади нон-варіантних точок відповідних ізотерм розчинності. У системах простежуються відмінності у комплексоутворюючій здатності елементів церієвої та ітрієвої підгруп, а також серед „легких” лантаноїдів. Протікаючі конкуруючі реакції є сильнодіючим технологічним чинником, суттєво впливаючим на зміну активності структурних форм  $\text{Ln}^{3+}$ .

Складність перетворень ілюструє горизонтальна проекція ізотерми розчинності системи  $\text{KNO}_3 - \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 - \text{Nd}(\text{NO}_3)_3 - \text{H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$  (рисунок).

Усі можливі види сполук синтезовані у монокристалічному вигляді.

Проведено системне вивчення їх будови, форми поліедрів, типів координації лігандр, можливі способи просторового упакування, низки їх властивостей. Визначені межі їх ізостехіометричності та ізоструктурності за рядами  $\text{Ln} - \text{Y}^{3+}$ ,  $\text{La}^{3+} - \text{Lu}^{3+}$ ;  $\text{Me} - \text{Li}^+ - \text{Cs}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ;  $\text{Mg}^{2+} - \text{Ba}^{2+}$ . Виявлено, що координаційні нітрати рідкісноземельних і лужних елементів, що кристалізуються із водних розчинів, розплавів, налічують понад 60 представників і утворюють, як доказано рентгеноструктурним аналізом, 13 груп ізотипних за будовою сполук.

За допомогою дериватографу і розробленого пристрою для ДТА із за-

стосуванням РФА й елементного аналізу до 1000 °C простежені теплові перетворення кожного з них.

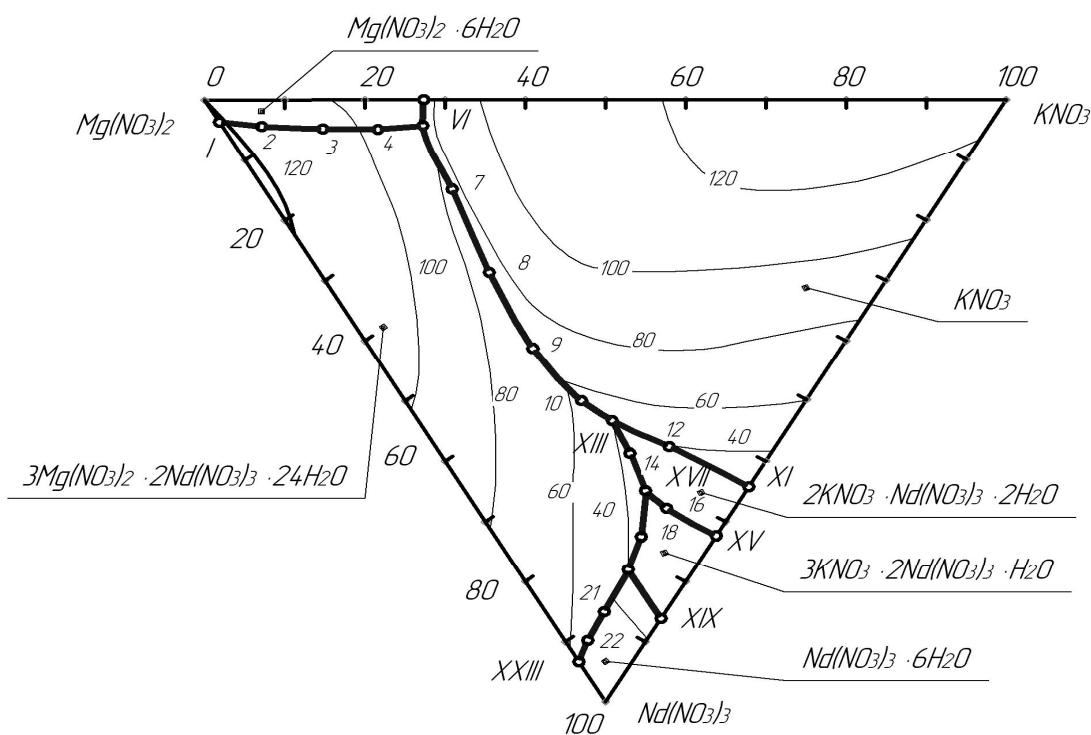


Рис. – Горизонтальна проекція просторової діаграми розчинності системи  $\text{KNO}_3 - \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 - \text{Nd}(\text{NO}_3)_3 - \text{H}_2\text{O}$  при 50 °C

Значення температур виявлених ефектів, їх характер, природа систематизовані. Одержані дані дозволяють проводити ідентифікацію фаз. Встановлена низка особливостей та закономірностей. Робиться їх обґрунтування з позицій конкуруючих процесів. Виходячи із особливостей технологічних схем одержання оксидних матеріалів, для авторів становлять інтерес області концентраційних співвідношень компонентів, яким відповідають на фазових діаграмах поля кристалізації вихідних нітратів РЗЕ, координаційних сполук, їх сумішей.

Позитивною особливістю використання вказаних РЗЕ-вмісних нітратних систем порівняно з іншими легкорозчинними системами хлоридів, оксалатів є те, що конкуруючі іоннообмінні взаємодії приводять до легкого утворення цілого класу аніонних координаційних сполук  $\text{Ln}^{3+}$  з атомами окисигену (донорами електронів)  $\text{NO}_3^-$ -груп (лігандрів) усього природного ряду рідкісноземельних елементів з усіма катіонами лужних металів, а ще до того ж стійких, як у розчинах, так і у розплавах. Це дозволяє здійснювати технологічні перетворення з низькими енергетичними затратами (внаслідок

малого значення енергії активації процесів комплексоутворення  $\text{Ln}^{3+}$  з пла-парними малими за розміром  $\text{NO}_3^-$ -групами). Комплексні сполуки легкоплавкі, малоагресивні, елементів церієвої підгрупи – нелеткі. Це дозволяє працювати при більш низьких температурах, розширюється температурна область існування стійких комплексних частинок.

Результати дослідження свідчать, що процеси одержання оксидних РЗЕ-вмісних конструкційних і функціональних матеріалів з використанням нітратів елементів різної електронної структури хімічним змішуванням вихідних компонентів при спільному виділенні продуктів із рідкої фази послідовним чи сумісним осадженням з наступною термообробкою відбуваються через утворення низки проміжних фаз. Їх вміст і поведінка у кожному конкретному випадку потребують попередніх системних емпіричних знань про їх сумісну поведінку у повних концентраційних співвідношеннях при заданому температурному інтервалові. Одержані нові знання виступають фундаментом для пошуку способів збільшення активності Ln-форм, з'ясування природи послідовних температурних перетворень у нітратних РЗЕ-вмісних багатокомпонентних системах різних агрегатних станів у ході їх термооброблення, при створенні сучасних досконалих низько затратних технологій синтезу функціональних матеріалів різного призначення із відтворюальними властивостями.

**Список літератури:** 1. Тітов Ю.О. Особливості механізмів утворення шаруватих скандалів  $\text{SrLn}_n\text{Sc}_n\text{O}_{3n+1}$  із систем сумісно закристалізованих нітратів / [Ю.О. Тітов, М.С. Слободянік, Я.А. Краєвська та ін.] // Укр. хим. журн. – 2010. – Т. 76, № 5. – С 11 – 16. 2. Кобилянська С.Д. Синтез нанорозмірних систем  $(\text{Li}, \text{La})\{\text{Ti}, \text{Nb}\}\text{O}_3$  методом золь-гель / С.Д. Кобилянська, О.М. Гавриленко, Ю.П. Гомза // Укр. хим. журн. – 2010. – Т. 76, № 4. – С 84 – 88. 3. Солопан С.О. Золь-гель синтез плівок системи  $\text{La}_{0.775}\text{Sr}_{0.225}\text{MnO}_3$  та їх властивості / С.О. Солопан, О.І. В'юнов, А.Г. Білоус // Укр. хим. журн. – 2010. – Т. 76, № 5. – С 17 – 20. 4. Гавриленко О.М. Кристалохімічні особливості та властивості  $\text{Li}^+, \{\text{Na}^+, \text{K}^+\}$ -заміщених ніобатів лантану і структурою дефектного перовскіту / О.М. Гавриленко, О.В. Пацкова, А.Г. Білоус // Укр. хим. журн. – 2005. – Т. 71, № 8. – С 73 – 77. 5. Гавриленко О.М. Літій провідні матеріали на основі ніобатів і танталатів лантану: синтез, структура, властивості / О.М. Гавриленко // Укр. хим. журн. – 2004. – Т. 70, № 9. – С 31 – 34. 6. Дурилин Д.А. Синтез, структура и свойства системы твердых растворов  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Na}_x\text{MnO}_3$  / [Д.А. Дурилин, О.З. Янчевский, А.И. Товстолиткин и др.] // Укр. хим. журн. – 2004. – Т. 70, № 9. – С 34 – 37. 7. Белоус А.Г. Влияние способа получения на фазовые превращения, структуру и магниторезистивные свойства мanganитов  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  / [А.Г. Белоус, Е.В. Пацкова, О.И. В'юнов и др.] // Укр. хим. журн. – 2005. – Т. 71, № 5. – С. 17 – 23. 8. Солопан С.О. Синтез і властивості композиційних структур на основі сегнетоелектричних та магнітних фаз / [С.О. Солопан, О.І. В'юнов, Л.Л. Коваленко та ін.] // Укр. хим. журн. – 2006. – Т. 72, № 1. – С. 28 – 31. 9. Тітов Ю.О. Умови ізовалентного заміщення атомів РЗЕ в п'ятишаровій структурі  $\text{CaLn}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$  / Ю.О. Тітов, М.С. Слободянік, В.В. Чумак // Укр. хим. журн. – 2006. – Т. 72, № 7. – С 3 – 6. 10. T. Yanagida,

*T. Roh et al. // Nucl. Instr. Methods in Phys. Res. – 2007. – Vol. A 579. – P. 23 – 26.* **11.** Пашин С.Ф. Влияние катионного замещения в твердых растворах  $\text{YBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$  на температуру сверхпроводимости / С.Ф. Пашин, Е.В. Антипов, Л.М. Ковба // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. – 1990. – Т. 3, № 10. – С. 2386 – 2389. **12.** Белоус А.Г. Сложные оксиды металлов для сверхвысокочастотных и высокопроницаемых диэлектриков / А.Г. Белоус // Теорет. и эксперим. химия. – 1998. – Т. 34, № 6. – С. 3 – 21. **13.** Миттра Р. Критический взгляд на метаматериалы / Р. Миттра // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 9. – С. 1051 – 1058. **14.** Стороженко Д.О. Особливості хімічного змішування компонентів на підготовчих стадіях при синтезі оксидів них РЗЕ-вмісних матеріалів / [Д.О. Стороженко, О.Г. Дрючко, І.О. Іваницька та ін.] // Вестник НТУ «ХПІ». – 2010. – № 65. – С. 94 – 100. **15.** Дрючко О.Г. Фізико-хімічні аспекти використання РЗЕ-вмісних нітратних систем при синтезі конструкційної і функціональної кераміки / [О.Г. Дрючко, Д.О. Стороженко, Н.В. Бунякіна та ін.] // Зб. наукових праць ВАТ «УкрНДІВ ім. А.С. Бережного». – Х.: Каравела, 2010. – № 110. – С. 58 – 63.

*Надійшла до редколегії 09.06.11*

УДК 541.183:622.33 + 622.693

**С.Д. БОРУК**, канд. хим. наук, доц. ЧНУ, Черновцы,  
**А.И. ЕГУРНОВ**, канд. техн. наук, президент, ООО «АНА-ТЕМС»,  
Днепропетровск

## **ПОЛУЧЕНИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИОННОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ**

Установлено, что введение до нефтяных отходов жидких продуктов пиролиза резины позволяет уменьшить их вязкость и снизить температуру вспышки, что дает возможность их использования как топлива или дисперсионной среды для получения супензионного угольного топлива. Показано, что для получения угольных супензий можно использовать низкокалорийные энергоносители (отходы углеобогащения, бурый уголь).

Показано, что введение в нефтешламы жидких продуктов пиролиза резины позволяет уменьшить их вязкость и снизить температуру вспышки, что дает возможность их использования как топлива или дисперсионной среды для получения супензионного угольного топлива. Установлено, что при получении угольных супензий можно использовать низкокалорийные энергоносители (отходы углеобогащения, бурый уголь).

The introduction to the petroleum liquid products of waste rubber to reduce its viscosity and increase the temperature flash that allows to use such as fuel mixture or dispersion medium for suspension of coal fuel. Shown that for a coal slurry can use low-calorie energy.

На энергетическом рынке ряда стран, в том числе и Украины, наметилась тенденция накопления низкокалорийных, некондиционных (по зольности, содержанию серы) твердых и псевдо жидких энергоносителей [1]. Их источником являются как малоэффективно работающие углеобогатительные и нефтеперерабатывающие предприятия, работа которых сопровождается образованием значительных количеств отходов с высоким содержанием топливной составляющей. Так же сырьевая база вторичных энергоресурсов постоянно увеличивается за счет накопления автомобильных шин, непригодных к дальнейшей эксплуатации и других полимерных отходов. Их хранение сопровождается негативным влиянием на окружающую среду, поскольку они практически не подвергаются биологической деградации и являются источником долговременного загрязнения. Одним из наиболее перспективных методов утилизации отработанных полимерных отходов, реализация которого позволяет получить продукты, которые можно использовать в дальнейшем в народном хозяйстве, является пиролиз [2]. Однако жидкие продукты пиролиза полимерных отходов характеризуется низкой температурой вспышки, что ограничивает возможности их непосредственного сжигания.

Рациональным решением проблемы применения данных энергоносителей является получение на их основе жидкого, усредненного по составу, суспензионного топлива. Получение и применение угольных суспензий, как показали проведенные исследования [3], позволяют повысить калорийность жидкого топлива, кроме того сжигание твердых энергоносителей в виде суспензий позволяет значительно сократить выбросы основных загрязняющих веществ и парниковых газов.

В качестве объекта исследования нами были выбраны:

- нефтяной шлам НГДУ "Долинанафтогаз";
- нефтяные отложения (донные отложения емкостей, в которых хранится нефть до переработки);
- жидкие продукты пиролиза резины, фракции отгона 55 – 185 °C;
- буре вугілля марки «Б», Александрійського родовища;
- відходи вуглезагачення вугілля марки «Т», центральної збагачувальної фабрики «Кондратьєвська».

Проведенное исследование физико-химических свойств нефтяных отложений и нефтешламов подтвердило невозможность и нецелесообразность их непосредственного использования в качестве топлива. Указанные образцы имеют большую вязкость, находясь в псевдо твердом состоянии, что затруд-

няет процессы их добычи. Кроме того указанные образцы при снижении температуры ниже 4 – 5 °С застывают и в случае их непосредственного подачи к горелке по трубам при низких температурах состоится застывания шламов и закупорка трубы. Непосредственное введение в нефтяные шламы дисперсного угля или других видов твердого топлива нецелесообразно и невозможно вследствие высокой вязкости. Получения однородной системы в данном случае усложняется, а проведение помола становится невозможным.

Для снижения вязкости были приготовлены смеси с различным соотношением нефтешламов и жидких продуктов пиролиза, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики смесей нефтяные отходы – жидкие продукты пиролиза

№	Состав смеси	Вязкость, Па·с			Высота отслоенной жидкости, мм			Теплотворная способность, кДж/кг	Температура вспышки, °С
		1 час	24 часа	72 часа	1 час	24 часа	72 часа		
Нефтяные отложения									
1	Продукты пиролиза	0,2	0,2	0,2	–	–	–	48800	75
2	Нефтяные отложения	–	–	–	–	–	–	28500	180
3	4 : 1	1,80	1,89	2,24	–	–	1	34350	135
4	3 : 1	1,30	1,45	1,75	1	2	4	36500	125
5	2,5 : 1	1,20	1,34	1,60	2	3	5	38600	115
6	2 : 1	1,10	1,25	1,50	3	6	8	52800	110
7	2,5 : 1 + 10% угля	1,50	1,60	1,74	1	2	2	43150	115
8	2,5 : 1 + 10% пирокарбона	1,55	1,73	1,84	1	1	2	35400	115
Нефтяные шламы									
1	Нефтяные шламы	–	–	–	–	–	–	27200	320
2	8,5 : 1,5	1,54	1,64	1,75	–	–	1	32500	190
3	4 : 1	1,46	1,62	1,7	–	1	2	34100	181
4	3 : 1	1,23	1,34	1,4	–	1	3	36250	168
5	7 : 3	1,11	1,21	1,36	1	3	4	38000	143
6	6,5 : 3,5	1,03	1,15	1,21	2	4	7	39450	128

Как видно из данных, лучшими эксплуатационными характеристиками

(теплотворная способность, температура вспышки) обладают системы полученные путем смещивания с продуктами пиролиза нефтяных отложений. Полученные системы имеют большую вязкость и седиментационную устойчивость по сравнению с системами на основе нефтешламов.

Относительно низкая температура вспышки позволила провести позволила получить топливо, пригодное, как показали проведенные на опытно-промышленной установке исследования, для непосредственного сжигания. Интересны экстремальные данные по теплотворной способности образцов при соотношении нефтяные отложения – жидкие продукты пиролиза = 2 : 1. Вероятно, при данном соотношении удается достичь оптимального для процесса горения состава: органические вещества – вода – минеральная составляющая, при котором минеральные вещества способны проявлять катализические свойства. То есть происходит микрогетерогенных катализ, что приводит к более полному выгоранию топливной составляющей (что подтверждается визуальными наблюдениями), а также частичного разложения воды, что приводит к повышению общей теплотворной способности образцов.

Однако, учитывая малое количество указанных вторичных энергоресурсов, перспектив широкого применения они не имеют.

Смеси, полученные на основе нефтяных шламов, характеризуются примерно такими же физико-химическими свойствами. Существенные различия наблюдаются в эксплуатационных характеристиках. Значительно выше температура вспышки, что создает дополнительные сложности при использовании указанных смесей как топлива. Без подсветки, как показали опытно-промышленные испытания, можно использовать смеси при соотношении компонентов 1 : 1. Но такие системы седиментационно не устойчивы и быстро происходит расслоение на легкие и тяжелые фракции. Рациональным путем их стабилизации и повышения теплотворной способности является введение в их состав дисперсного угля.

Таким образом, смещение 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. 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. Эксплуатационные характеристики смеси нефтяные отходы – жидкие продукты пиролиза, в первую очередь тепло-творная способность, выше, чем при сжигании компонентов отдельно, вероятно за счет реализации микрогетерогенного катализа процессов горения.

Нами были получены системы с концентрацией твердой фазы 61 – 66 масс. % для отходов углеобогащения угля марки «Т» и 29 – 32 масс. % для бурого угля на основе жидких продуктов пиролиза (табл. 2).

В указанном диапазоне концентраций наблюдается линейная зависимость вязкости от концентрации. Дальнейшее увеличение концентрации нежелательно, так как вязкость начинает возрастать по экспоненте. Преимуществом полученных систем является также их высокая седиментационная устойчивость.

Таблица 2  
Физико-химические и эксплуатационные характеристики суспензий  
на основе жидких продуктов пиролиза резины

Образец	Эффектив- ная вяз- кость, Па·с	Седиментаци- онная устой- чивость, сутки	Степень выгора- ния топливной со- ставляющей, %	Теплообразую- щая способность (кДж/кг)
Жидкие продукты пиро- лиза резины	0,22	–	100	48800
Шламы угля марки «Т», ЦОФ Кондрать- евская	–	–	83,5	22250,8
Суспензия на основе шламов угля марки «Т», ЦОФ, С <sub>тв</sub> = 63 %	1,23	30	99,5	34500
Бурый уголь,	–	–	86,5	35200
Суспензия на основе бурого угля, С <sub>тв</sub> = 30%	1,35	30	99,3	41200

Как видно из приведенных данных полученные системы 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.

**Список литературы:** 1. Основні положення енергетичної стратегії України на період до 2003 р.: ухв. Кабміном Укр. від 15.03.06. – Київ: Мінпаливenerго України, 2006. – 129 с. 2. Егурнов О.І. Шляхи підвищення теплотворної здатності твердого брикетованого палива / [О.І. Егурнов, В.М. Соколик, Б.В. Литвин і др.] // Збагачення корисних копалин. – 2010. – Вип. 43 (84). – С. 165 – 169. 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.

Поступила в редакцию 24.06.11

УДК 622.7.05

**П.А. БАКУМ**, аспирант, ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск

## **ЭТАПЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ РУДОПОДГОТОВКИ ТИТАНОЦИРКОНИЕВЫХ ПЕСКОВ**

Розглянуто еволюцію технології знешламлення титаноцирконієвих пісків на Вільногірському державному гірничо-металургійному комбінаті. Описуються основні проблеми, що виникали при експлуатації схеми знешламлення, та шляхи їхнього вирішення. Дається бачення подальшого вдосконалення схеми, що дозволить зменшити втрати корисних компонентів.

Рассмотрена эволюция технологии обесшламливания титаноциркониевых песков на Вольногорском государственном горно-металлургическом комбинате. Описываются основные проблемы, которые возникали при эксплуатации схемы обесшламливания и пути их решения. Даётся видение дальнейшего совершенствования схемы, что позволит уменьшить потери полезных компонентов.

The evolution of titan-zirconium de-slime technology sands at Volnogorsky state mining-metallurgical plant is observed. The basic problems which appeared at maintenance of the de-slime scheme, and ways of their solution are described. Vision of the further improvement scheme that allows to reduce useful components losses is given.

Изменяющиеся с течением времени условия добычи рудных песков, их качественно-количественные показатели и увеличивающаяся дальность

транспортирования руды требует своевременного пересмотра режимных параметров эксплуатации основного оборудования и технологической схемы рудоподготовки в целом. В частности, на Вольногорском государственном горно-металлургическом комбинате (ВГГМК) масштабная реконструкция обогатительной фабрики была произведена в 90-х годах в связи с заменой конвейерного транспорта рудных песков на гидротранспорт.

На рис.1 приведена схема дезинтеграции и обесшламливания, используемая до 1995 г.

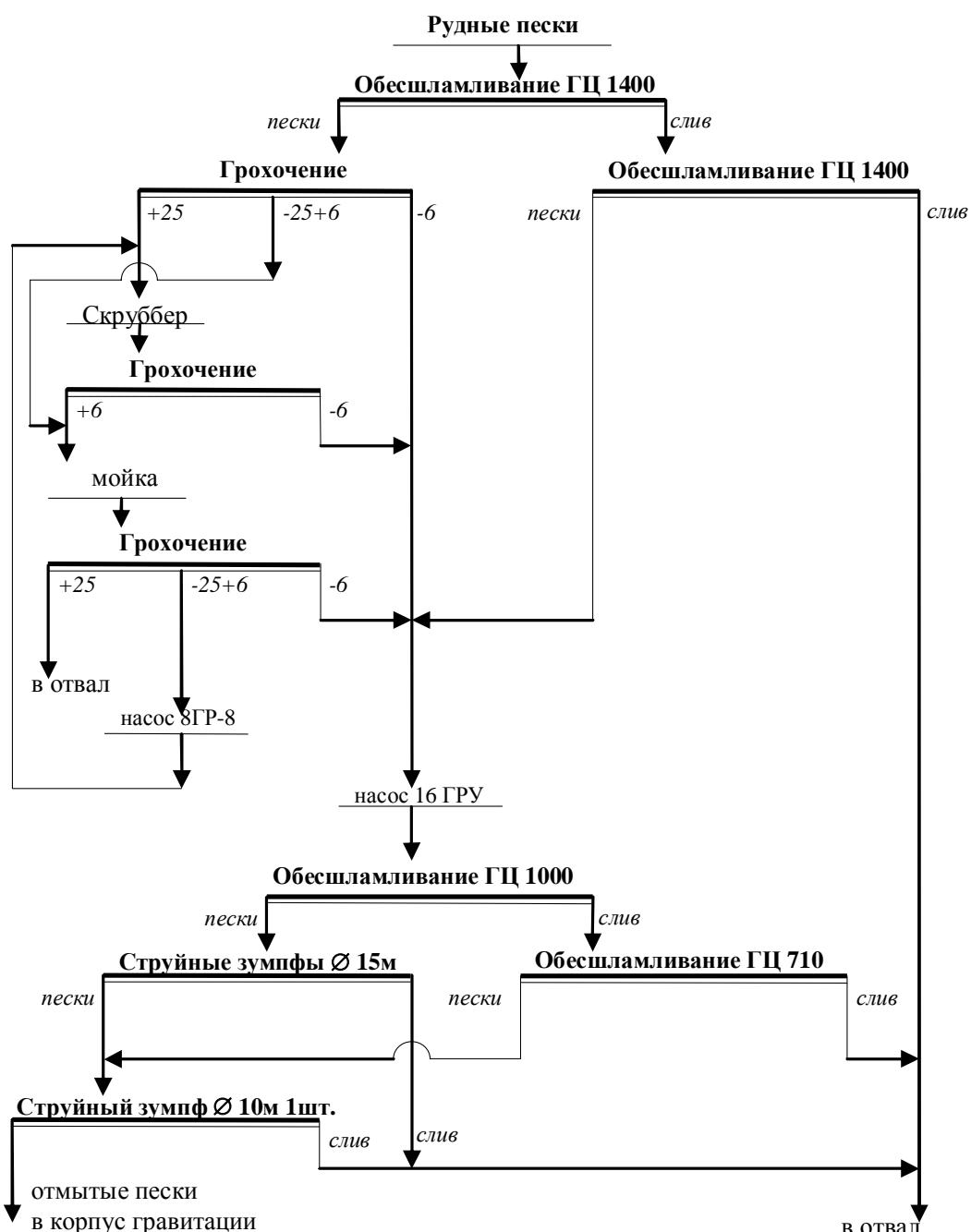


Рис. 1. Схема дезинтеграции и обесшламливания рудных песков (до 1995 г.)

Как видно, данная схема являлась сложной и энергоемкой. По новой же схеме рудные пески, подаваемые на фабрику гидротранспортом, неплохо дезинтегрировались, кусковой материал содержался в незначительных количествах.

Новая технологическая схема подготовки песков к обогащению (рис. 2) обеспечивала получение отмытых песков требуемого качества и отличалась от предыдущей (рис. 1) простотой технологии и низкими энергетическими затратами.

Поскольку дезинтеграция песков осуществлялась в процессе гидротранспорта, то барабанные скруббера, мойки-дезинтеграторы, насосы 16 ГРУ (2 шт.), гидроциклоны ГЦ 1000 (6 шт.) и ГЦ 710 (12 шт.) не были включены в технологическую схему обесшламливания (рис. 2).

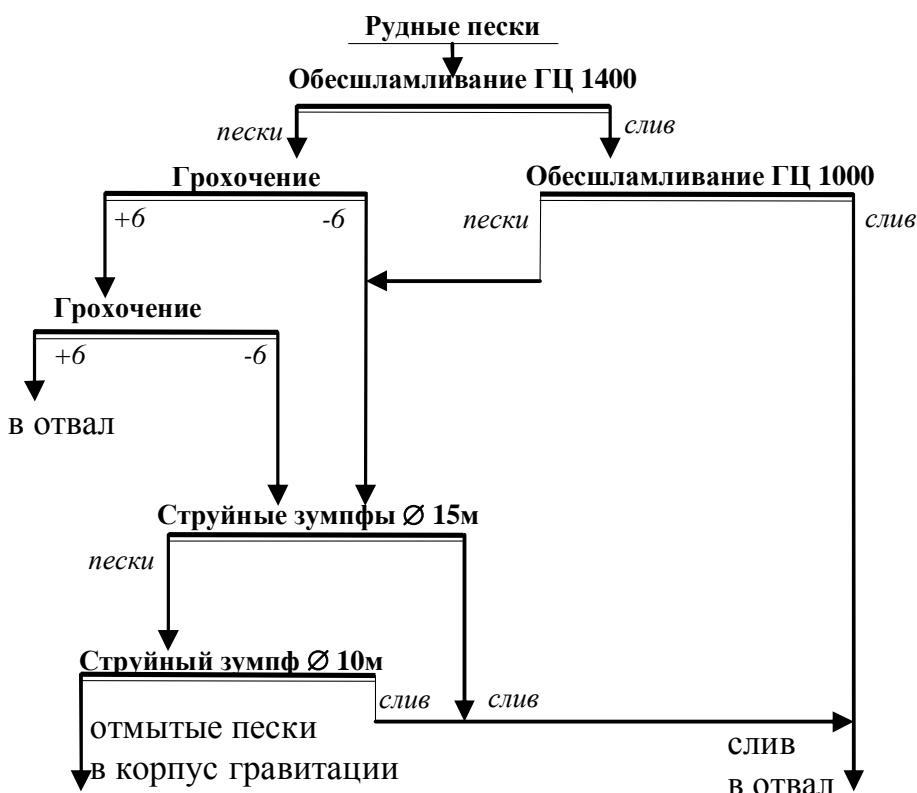


Рис. 2. Схема обесшламливания рудных песков (с 1995 г.)

Основные потери ценных минералов происходили при обесшламливании песков в гидроциклах и были связаны с нестабильным режимом движения потока (толчками), в результате чего происходил сброс зернистой фракции песков со шламами в отвал: содержание зернистой фракции в шламах повышалось с 3 – 4 г/л до 200 – 800 г/л. Основными причинами высоких потерь ценных минералов при обесшламливании являлись прямая связь

пульпопровода рудник-фабрика с гидроциклонами, которые подвергались перегрузке гидроциклонов с последующим выбросом полезных минералов со шламами в отвал.

В дальнейшем последовательность стадий грохочения и обесшламливания была изменена так, что указанный недостаток был устранен путем введения операции основного и контрольного грохочения [1] крупнокускового материала (рис. 3).

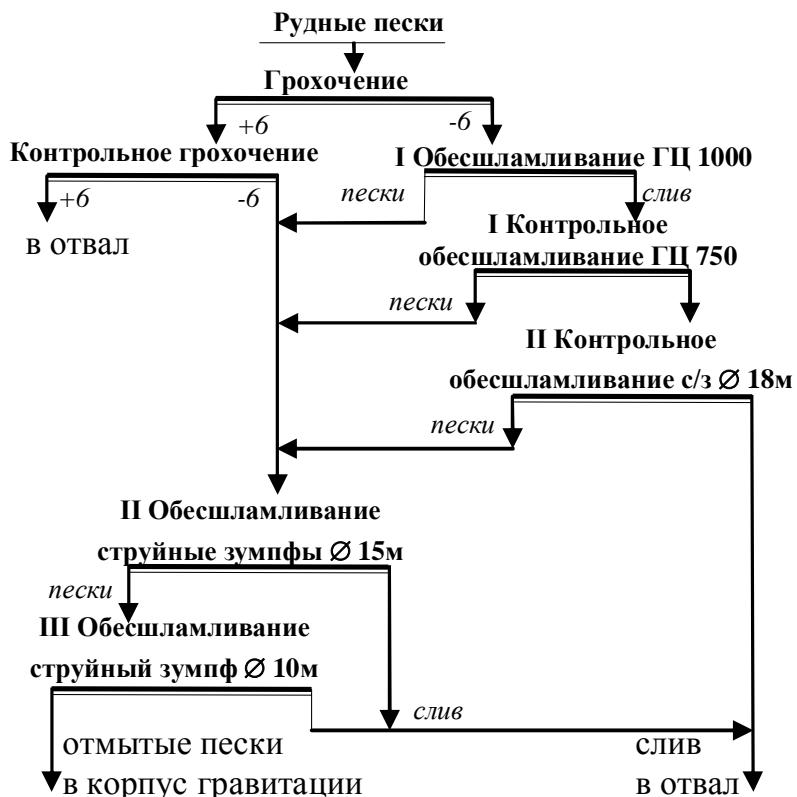


Рис. 3. Схема обесшламливания рудных песков (с 2002 г.)

Для устранения нестабильного движения потока суспензии перед подачей питания в гидроцилоны, – после грохочения рудные пески направили в две напорные ванны объемом  $35 \text{ м}^3$  каждая. Это позволило ввести в эксплуатацию низконапорные гидроцилоны (с самотечной запиткой) ГЦ 1000, устанавливаемые под углом  $30^\circ$  к горизонту.

Слив гидроцилонов ГЦ 1000 направили на контрольное обесшламливание в наклонные гидроцилоны ГЦ 750.

Также была произведена доработка схемы обесшламливания путем применения контрольной операции в струйных зумпфах (18 м), куда направили слив контрольных гидроцилонов.

Включенные в технологическую схему струйные зумпфы позволили из-

влекать до 1,5 % ценных минералов.

Недостатком схемы стали потери со шламами до 1 % основных минералов, что составило порядка 50 % общих потерь при рудоподготовке.

Следует отметить, что с переходом на эту технологию улучшились показатели работы гидротранспорта: производительность возросла в 1,7 раза, расход электроэнергии снизился с 4,03 до 3,53 кВт·ч/т, расход воды снизился с 4,4 м<sup>3</sup>/т до 3,2 м<sup>3</sup>/т.

Применение низконапорных наклонных гидроциклонов позволило увеличить срок их службы с 1-го до 3 месяцев.

В результате отработки новых месторождений на фабрике возникла необходимость дальнейшей реконструкции технологической схемы рудоподготовки.

В частности, слив струйных зумпфов диаметром 15 м направили на контрольное обесшламливание в зумпфы диаметром 18 м, которые были заменены гидроциклонами ГЦ 750 (рис. 4).

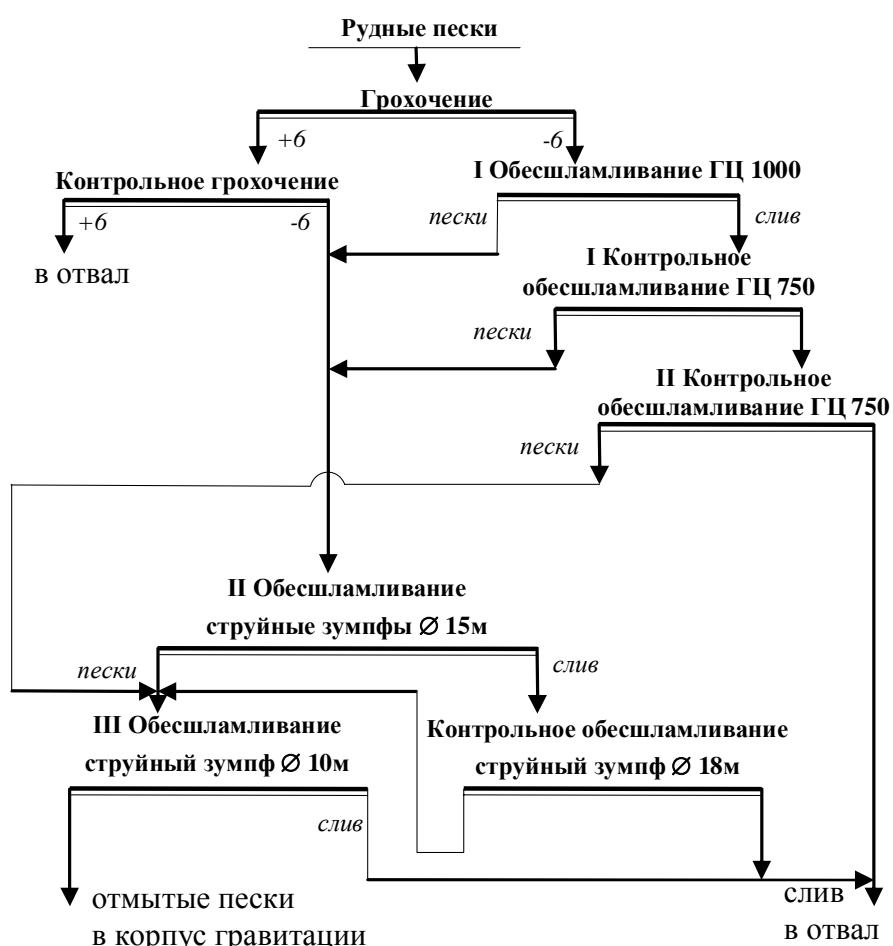


Рис. 4. Действующая технологическая схема рудоподготовки на ВГГМК

Предложенный на рис. 4 технологический вариант рудоподготовки не решил проблемы снижения потерь ценных минералов на заключительных этапах обесшламливания.

В данной работе предлагается комплексное решение указанной проблемы, включающее на первом этапе изучение реологических свойств оборотной воды в технологии обесшламливания.

Основным показателем качества оборотной воды является содержание дисперсной твердой фазы – глины. Глинистая суспензия повышает вязкость среды, в которой происходит процесс классификации, что снижает скорость осаждения минеральных зерен.

При осаждении в струйных зумпфах это приводит к росту потерь ценных минералов, уходящих со сливом [2]. Поэтому, рекомендуется при осаждении в струйных зумпфах вести процесс в разбавленных средах с содержанием глины в сливе не более 2 – 3 %. Также особое внимание следует уделять петрографическим свойствам глинистой составляющей суспензии, так как, во многом, накопление твердой фазы в оборотной воде зависит от текстуры и химического состава глины.

При проведении мероприятий по улучшению качества оборотной воды необходимо учитывать, что её очистка в шламоотстойниках зависит от ряда факторов: сезонных (промерзание зимой и испарение воды летом); климатических (осадки, ливневые стоки, паводки); дисперсности глины (излишнее диспергирование при гидротранспорте); времени осветления (дебит воды и объем хвостохранилища).

На следующем этапе предлагается определить рациональные режимные параметры эксплуатации обесшламливающих аппаратов. К основным факторам, влияющим на вероятность извлечения частиц твердой фазы в слив, следует отнести: глинистость пульпы, концентрацию твердой фазы, объемный расход по питанию, сливу и пескам, а также уровень осветленного слоя (в случае со струйными зумпфами).

Оптимальное сочетание этих параметров позволит снизить потери полезных минералов при рудоподготовке перед основными операциями обогащения.

Также следует отметить, что улучшить сепарационные характеристики дешламационного оборудования можно с помощью некоторых конструктивных изменений. Например, применение входной насадки для гидроциклонов с вводом питания по расширенной эвольвенте (оборудование серии «МАХ»

от компании Krebs) по внешней стенке, а также особая конструкция конической части, состоящей из крутоконусной верхней секции с последующей удлиненной нижней частью с острым углом позволяет в значительной степени повысить эффективность работы гидроциклонов.

Особая конструкция входной насадки позволяет предварительно классифицировать частицы твердой фазы в питании перед входом в основной корпус гидроциклона, а удлиненная конусная часть увеличивает скорость потока в верхней части гидроциклона и обеспечивает длительное время нахождения частиц в критических зонах сепарации в нижних секциях.

В результате имеется возможность более тонкой классификации в гидроциклах большого диаметра, а также высокое извлечение мелких частиц в слив.

Модернизация струйных зумпфов является более сложной задачей, поскольку значительные геометрические размеры этих аппаратов требуют больших капитальных затрат для проведения многофакторных экспериментов в лабораторных и полупромышленных условиях. Но, тем не менее, уже сейчас существуют варианты модернизации сгустителей-классификаторов посредством установки блоков тонкослойных осветителей (компания «Гормашэкспорт»), а также систем подачи питания (питающих колодцев) и механизмов удаления шлама.

Особенно интересным является направление, связанное с исследованием гидродинамики потоков в аппарате и перераспределение шлама за счет изменения режима подачи питания, например, с центрального на радиальный или тангенциальный.

**Список литературы:** 1. Сокил А.М. Ресурсосберегающая технология рудоподготовки титано-цирконовых песков / А.М. Сокил, В.М. Герусов, В.П. Краснопер // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 2. – С. 76 – 78. 2. Пилов П.И. Влияние качества оборотной воды на показатели обогащения титано-циркониевой руды / П.И. Пилов, Н.М. Вершинина, В.П. Краснопер // Збагачення корисних копалин. – 2009. – Вып. 36 (77) – 37 (78). – С. 192 – 196.

Поступила в редакцию 15.06.11

**O.A. КОРНИЕНКО**, канд. хим. наук, научн. сотрудн.,  
ІПМ НАНУ им. И.Н. Францевича, Киев

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И СВОЙСТВА ФАЗ В СИСТЕМЕ CeO<sub>2</sub> – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ПРИ 1100 °C**

Вперше вивчені фазові рівноваги в системі CeO<sub>2</sub> – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при температурі 1100 °C у всьому інтервалі концентрацій. Нових фаз в системі виявлено не було. У системі існують області твердих розчинів на основі моноклінної (B), кубічних (C і F) модифікацій оксидів редкоземельних елементів.

Впервые изучены фазовые равновесия в системе CeO<sub>2</sub> – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при температуре 1100 °C во всем интервале концентраций. Новых фаз в системе обнаружено не было. В системе существуют области твердых растворов на основе моноклинной (B), кубических (C и F) модификаций оксидов редкоземельных элементов.

First there have been studied phase equilibria in the system CeO<sub>2</sub> – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 1500 °C in the full range of concentrations. No new phases were found. The fields of solid solutions based on monoclinic (B), cubic (C and F) modifications of rare-earth oxides were revealed in the system.

Диаграммы состояния систем на основе CeO<sub>2</sub> с оксидами РЗЭ представляют значительный научный и практический интерес для разработки материалов твердых электролитов для топливных ячеек, кислородных газовых датчиков, огнеупорной футеровки печей и защитных покрытий на сплавы [1 – 7]. Ранее были исследованы фазовые равновесия в указанной системе при 1500 °C [8].

Цель настоящей работы – изучение взаимодействия и физико-химических свойств образующихся фаз в двойной системе CeO<sub>2</sub> – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при температуре 1100 °C.

В качестве исходных веществ использовали азотнокислую соль церия Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O марки Ч, азотную кислоту марки ЧДА и Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 °C в течение 2 ч. Порошки прессовали в таблетки диаметром 5 и высотою 4 мм под давлением 10 МПа. Образцы обжигали на воздухе в печи с нагревателями H23U5T (фехраль), (10813 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 ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение). Скорость сканирования составляла 1 – 4 град/мин в диапазоне углов  $2\theta = 15 - 80^\circ$ . Периоды кристаллических решеток рассчитывали методом наименьших квадратов, используя программу LATTIC, с погрешностью не ниже 0,0004 нм для кубической фазы. Состав образцов контролировали с помощью спектрального и химического анализов выборочно.

Исследование твердофазного взаимодействия  $\text{CeO}_2$  (тип флюорита, F) и  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (моноclinная модификация оксидов РЗЭ, В) показало, что в системе  $\text{CeO}_2 - \text{Sm}_2\text{O}_3$  образуются три типа твердых растворов: кубической структуры на основе флюорита F –  $\text{CeO}_2$  и C –  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ , а также моноclinной модификации В –  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ , которые разделены между собой двухфазными полями (F + C) и (C + В) (рисунок).

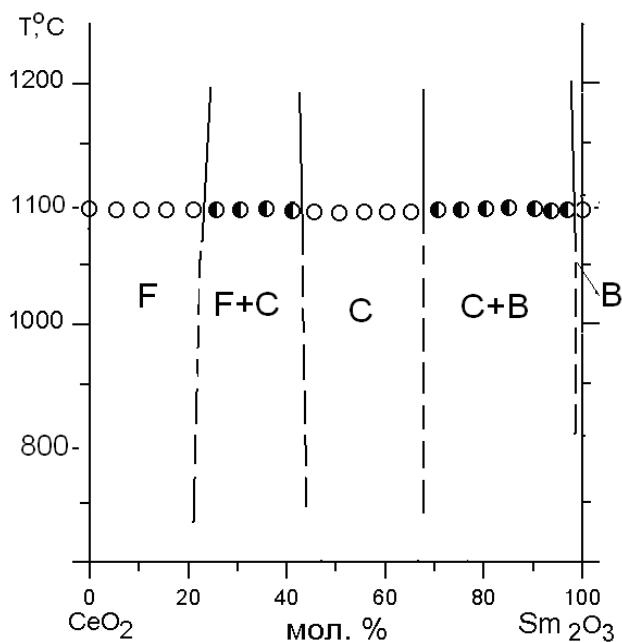


Рис. – Фазовые равновесия системы  $\text{CeO}_2 - \text{Sm}_2\text{O}_3$  при  $1100^\circ\text{C}$ :

○ - однофазные, ● - двухфазные образцы

Исходный химический и фазовый состав образцов, обожженных при  $1100^\circ\text{C}$ , периоды кристаллических решеток фаз, находящихся в равновесии при заданной температуре, приведены в таблице.

Границы области гомогенности твердых растворов на основе F –  $\text{CeO}_2$ , C – и В  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  определены составами, содержащими 20 – 25, 55 – 60, 99 мол. %  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ( $1100^\circ\text{C}$ ), соответственно (таблица).

Таблица

Фазовый состав и параметры элементарных ячеек фаз системы CeO<sub>2</sub> – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

после обжига образцов при 1100 °C, 10813 ч (по данным РФА)

Химический состав, мол. %		Фазовый состав	Параметры элементарных ячеек фаз, нм ( $a \pm 0,0002$ )					
CeO <sub>2</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		<F>	<C>	<B>			
			<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	$\beta$	
0	100	<B>	–	–	1,3925	0,3632	0,8680	90,4
1	99	<B>+<C> <sub>сл.</sub>	–	1,0938	1,3153	0,3670	0,8666	84,5
2	98	<B>+<C> <sup>↑</sup>	–	1,0938	1,4002	0,3653	0,8721	92,6
3	97	<B>+<C> <sup>↑</sup>	–	1,0928	1,6469	0,3679	0,8726	97,7
4	96	<B> + <C> <sup>↑</sup>	–	1,0938	1,7067	0,3702	0,8719	99,8
5	95	<B> <sub>↓</sub> + <C> <sup>↑</sup>	–	1,0919	1,4041	0,3398	0,8718	84,1
15	85	<B> <sub>↓</sub> + <C> <sup>↑</sup>	–	1,0896	1,6291	0,3667	0,8734	96,7
20	80	<B> <sub>↓</sub> + <C> <sup>↑</sup>	–	1,0905	1,3113	0,3612	0,918	89,3
25	75	<B> <sub>↓</sub> + <C> <sub>осн.</sub>	–	1,0909	1,3514	0,3660	0,5208	87,9
30	70	<B> <sub>сл.</sub> <sub>↓↓</sub> + <C> <sub>осн.</sub>	–	1,0898	–	–	–	–
35	65	<C>	–	1,0903	–	–	–	–
40	60	<C>	–	1,0896	–	–	–	–
45	55	<C>	–	1,0904	–	–	–	–
50	50	<C>	–	1,0904	–	–	–	–
55	45	<C>	–	1,0905	–	–	–	–
60	40	<C> + <F>	0,5445	1,0892	–	–	–	–
65	35	<C> + <F>	0,5444	1,0888	–	–	–	–
70	30	<C> <sub>сл.</sub> + <F> <sub>осн.</sub>	0,5444	1,0887	–	–	–	–
75	25	<C> <sub>сл.</sub> <sub>↓↓</sub> + <F> <sub>осн.</sub>	0,5439	–	–	–	–	–
80	20	<F>	0,5431	–	–	–	–	–
85	15	<F>	0,5423	–	–	–	–	–
90	10	<F>	0,5423	–	–	–	–	–
95	5	<F>	0,5410	–	–	–	–	–
100	0	<F>	0,5409	–	–	–	–	–

Обозначения фаз: <B> – твердые растворы на основе моноклинной модификации Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; <C> – твердые растворы на основе кубической модификации оксидов редкоземельных элементов Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; <F> – твердые растворы на основе кубической модификации со структурой типа флюорита CeO<sub>2</sub>. Другие условные обозначения: осн. – фаза, которая составляет основу, сл. – следы фазы, <sup>↑</sup> – количество фазы увеличивается, <sub>↓</sub> – количество фазы уменьшается.

Из приведенных данных следует, что растворимость Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в F-модификации CeO<sub>2</sub> составляет 20 мол. % (1100 °C). Параметры элементарной ячейки увеличиваются от  $a = 0,5409$  нм для чистого CeO<sub>2</sub> до  $a = 0,5431$  нм для образца, содержащего 20 мол. % Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при 1100 °C.

Растворимость CeO<sub>2</sub> в моноклинной В-модификации оксида самария составляет 0,5 мол. % CeO<sub>2</sub>. На дифрактограмме двухфазного образца (В + С), содержащего 1 мол. % CeO<sub>2</sub> – 99 мол. % Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> четко видны линии характерные для С фазы Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, наряду с линиями В-Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, также отмечено присутствие незначительного количества пиков принадлежащих моноклинной модификации гидроксида самария Sm(OH)<sub>3</sub>.

Параметры элементарной ячейки В фазы изменяются от  $a = 1,3925$  нм,  $b = 0,3632$  нм,  $c = 0,8680$  нм,  $\gamma = 90,42$  для чистого Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до  $a = 1,3153$  нм,  $b = 0,3670$  нм,  $c = 0,8666$  нм,  $\gamma = 84,5$  (1100 °C) для предельного состава твердого раствора. С увеличением содержания оксида церия при 1100 °C на дифрактограммах наблюдали рост интенсивности линий С-модификации Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которая для состава, содержащего 3 мол. % CeO<sub>2</sub> заметно больше по сравнению с моноклинной В-модификацией оксида самария.

Параметры элементарной ячейки С-фазы изменяются от  $a = 1,0892$  нм до  $a = 1,0898$  нм (1100 °C) для двухфазного образца (С + В), содержащего 30 мол. % CeO<sub>2</sub> – 70 мол. % Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Выводы:** Изучены фазовые равновесия в системе CeO<sub>2</sub> – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> во всем концентрационном интервале при 1100 °C. 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.

**Список литературы:** 1. *Yen-Pei Fu. Aqueous processing of Ce<sub>0,8</sub>Sm<sub>0,2</sub>O<sub>1,9</sub> green tapes / Yen-Pei Fu, Sih-Hong // Chen Ceramics International. – 2009. – Vol. 35. – P. 821 – 825.* 2. *Shinsuke Suzuki. Watanabe Interaction of samaria-doped ceria anode with highly dispersed Ni catalysts in a medium-temperature solid oxide fuel cell during long-term operation / Shinsuke Suzuki, Hiroyuki Uchida, Masa-hiro // Solid State Ionics. – 2006. – Vol. 177. – P. 359 – 365.* 3. *Yarong Wang Synthesis, characterization and sinterability of 10 mol. % Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped CeO<sub>2</sub> nanopowders via carbonate precipitation / [Yarong Wang , Toshiyuki Mori , Ji-Guang Li at al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2006. – Vol. 26. – P. 417 – 422.* 4. *John B. Goodenough Alternative anode materials for solid oxide fuel cells / John B. Goodenough, Yun-Hui Huang // Journal of Power Sources. – 2007. – Vol. 173. P. 1 – 10.* 5. *Dan XU Study on rare earth electrolyte of SDC-LSGM / [XU Dan, LIU Xiaomei, ZHU Chengjun at al.] // Journal of rare earths. – 2008. – Vol. 26, № 2. – P. 241 – 244.* 5. *Riess I. Characterization of solid oxide fuel cells based on solid electrolytes or mixed ionic electronic conductors / I. Riess, M. Gödicke, L.J. Gauckler // Solid State Ionics. – 1996. – Vol. 90. – P. 91 – 10.* 6. *Mogens Mogensen. Physical, chemical and electrochemical properties of pure and doped ceria / Mogensen Mogensen, Nigel M. Sammes,*

*Geoff A. Tompsett // Solid State Ionics. – 2000. – Vol. 129. – P. 63 – 94.* **7.** *Ranløv J. Comment on “The characterization of doped CeO<sub>2</sub> electrodes in solid oxide fuel cells” by B.G. Pound / J. Ranløv, F.W. Poulsen, M. Mogensen // Solid State Ionics. – 1993. – Vol. 61. – P. 277 – 279.* **8.** *Андреевская Е.Р. Фазовые соотношения в системе CeO<sub>2</sub> – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при температуре 1500 °C / [Е.Р. Андреевская, О. А. Корниенко, В.С. Городо и др.] // Современные проблемы физического материаловедения. – 2008. – С. 25 – 28.*

*Поступила в редакцию 24.06.11*

УДК 504.064.4:691.32

**Л.С. САВИН**, докт. техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГАСА», Днепропетровск,  
**В.Н. МАКАРОВА**, аспирант, ГВУЗ «ПГАСА», Днепропетровск

## **КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА**

В статті пропонується комплексне використання відходів металургійної та гірничодобувної промисловості в виробництві бетону. Анліз даних отриманих в результаті лабораторного експерименту дозволяє зробити висновок про таку характеристику як міцність в'яжучого і внаслідок міцність бетону.

В статье предлагается комплексное использование отходов металлургической и горнодобывающей промышленности в производстве бетона. Анализ данных полученных в результате лабораторного эксперимента позволяет сделать вывод о прочностных характеристиках вяжущего и в последствии прочность бетона.

The article proposes complex use of metallurgical and mining industry waste in the production of concrete. The analysis of data obtained from laboratory experiments allows to make a conclusion on the binder and concrete strength.

В условиях значительного роста стоимости энергетических ресурсов значение приобретает производство строительных материалов, технология изготовления которых отличается пониженной энергоемкостью, а также применение высокоэффективных теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях.

Главная причина сложившейся ситуации – возникшая необходимость всемерной экономии энергии [1].

Несмотря на высокую технико-экономическую эффективность, объем отходов, применяемых при изготовлении ячеистых бетонов в настоящее вре-

мя значительно ниже возможного. Это связано с целым рядом организационных и технологических трудностей. Основные технологические трудности широкого применения в производстве ячеистых бетонов различных отходов промышленности обусловлены непостоянством их химико-минералогического состава и отсутствием надежных рекомендаций по оперативной корректировке состава сырьевой смеси в зависимости от характеристик поступающего сырья. Коэффициент основности позволяет оценить химическую активность сырья, рассчитать основность силикатов.

На основе значений коэффициента основности П.И. Боженов предлагает следующую классификацию побочных продуктов:

- 1)  $K_{осн}$  менее 0 – ультракислые;
- 2)  $K_{осн}$  от 0 до 0,8 – кислые (вяжущими свойствами не обладают, пригодны в качестве заполнителей и кислого компонента сырьевой смеси);
- 3)  $K_{осн}$  от 0,8 до 1,2 – нейтральные (вязущие свойства выражены слабо);
- 4)  $K_{осн}$  от 1,2 до 3,0 – основные (обладают вяжущими свойствами);
- 5)  $K_{осн}$  более 3,0 – ультраосновные (известняк и его аналоги).

Одним из первых разработкой направления по применению шлакощелочного вяжущего в технологии ячеистых бетонов занимались ученые Киевского инженерно-строительного института под руководством В.Д. Глуховского.

Ячеистый бетон на шлакощелочном вяжущем характеризуется высокой атмосферостойкостью и стойкостью к агрессивным средам, что позволяет расширить область его применения. Как отметил автор, в качестве щелочного компонента могут применяться различные промышленные отходы с содержанием  $R_2O$  не менее 75 %.

По аналогичной технологии на основе отходов производства и применения тарного, технологического и оконного стекла в Московском инженерно-строительном институте получены ячеистые бетоны повышенной коррозионной стойкости [2].

Нами предлагается комплексное вяжущее на основе отходов metallургической и горнодобывающей промышленности. За счет применения комплекса отходов предполагается получить теплоизоляционный материал, обладающий улучшенными свойствами.

Активность вяжущего ( $R$ ) является важнейшей характеристикой, определяющей прочность бетонов ( $R_b$ ). В течение длительного времени исходили

из казавшейся самоочевидной предпосылки о том, что ( $R_6$ ) изменяется прямо пропорционально ( $R$ ). Эта предполагаемая закономерность находила свое отражение во многих зависимостях для расчета прочности бетона, в частности, в известных формулах Абрамса, Беляева, Боломея, Скрамтаева, Баженова.

Широкие исследования, выполненные Л.А. Кайсером и Л.И. Левиным (ВНИИЖелезобетон) при разработке СН 386-74, а потом и СНиП 5.01.23-83, показали, что прочность бетона изменяется не прямопропорционально активности цемента, а лишь пропорционально этой величине, что выразилось формулой:

$$R_6 = 10 \cdot (\alpha \cdot \sqrt{R} \cdot \frac{U}{B} - 10 \cdot \beta), \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – опытные коэффициенты, характеризующие влияние качества используемых материалов.

В дальнейшем эта зависимость несколько трансформировалась, но сущность ее не менялась, а точность повышалась незначительно. В связи с этим возникло предположение, что физический смысл понятия «активность цемента» современными методами раскрывается и определяется не полностью, так как практически не учитывается прочность на растяжение при изгибе ( $r$ ), которая в настоящее время является чисто факультативной. В современных стандартах нормируется лишь её минимально допустимая величина. Однако с этим трудно согласиться, так как испытания образцов-балочек на изгиб более близки к реальному напряжённому состоянию бетона в конструкциях. Взаимосвязь прочности цементов при изгибе и сжатии, характеризующая дефектность структуры, что может количественно влиять на свойства бетона.

В соответствии с представлениями, развивамыми в работе [3], разрушение бетона происходит в результате сдвига по плоскостям скольжения в направлении действия наибольших касательных напряжений под углом:

$$45^0 - \frac{\phi}{2}, \quad (2)$$

где  $\phi = f(R, r)$ .

Отсюда видно, что на прочность бетона при сжатии существенное влияние должна оказывать его прочность на срез.

Модель Прандля-Кулона устанавливает зависимость между касательным напряжением (т. е. прочностью на срез) и прочностью материала на сжатие ( $R$ ) и растяжение ( $r$ ) с помощью известной формулы Кепке и Мерша:

$$0,5\sqrt{R \cdot r}, \quad (3)$$

где  $\sqrt{R \cdot r}$  – среднегеометрическая величина этих значений.

Все это дает основание искать более обобщающую характеристику цемента, которая бы непосредственно учитывала не только его прочность на сжатие, но и растяжение при изгибе. Ее целесообразно назвать приведенной активностью цемента ( $R_{\text{пр}}$ ). Для проверки изложенной гипотезы и обоснования подсчёта  $R_{\text{пр}}$  были вычислены значения  $R \cdot r$ , а также различных сочетаний  $r$  и  $R$  в соответствии с их полученными значениями для стандартной марки цемента и цемента с добавками (таблица).

Таблица  
Прочностные показатели и их сочетания для цементов различных марок (в кгс/см<sup>2</sup>)

Цемент	$\frac{R+r}{2}$	$\sqrt{R \cdot r}$	$\frac{R}{r}$	$\sqrt{R \cdot r} + \frac{R}{r}$	$\frac{R+r}{2} + \sqrt{R \cdot r}$	$\frac{R+r}{2} + \sqrt{R \cdot r} + \frac{R}{r}$	$\left(\frac{R}{r}\right)^2 + \frac{R+r}{2} + \sqrt{R \cdot r}$
400	68,75	55,74	3,82	59,56	124,5	128,31	139,11
400 + д1	77,5	60,85	4,25	65,1	138,35	142,6	156,44
400 + д2	71,65	58,72	3,68	62,4	130,38	134,06	143,9
400 + д1 + д2	72,55	58,02	4,0	62,03	130,6	134,6	146,6

Графическая интерпретация зависимостей  $R_{\text{пр}} = f(R, r)$  представлена на рисунке.

Анализ этих данных показал, что, пользуясь любым из графиков, можно находить  $R_{\text{пр}}$  по результатам испытаний стандартных балочек на изгиб и сжатие, подсчитывая те или иные сочетания  $r$  и  $R$ .

Надо заметить, что помимо учета специфического влияния прочности раствора на растяжение при изгибе на прочность бетона при сжатии введение её в расчёт увеличивает объем используемой информации, так как дополнительно к шести показателям на сжатие вводится в расчет три результата

прочности растяжения при изгибе, получаемые в результате стандартного определения активности цемента.

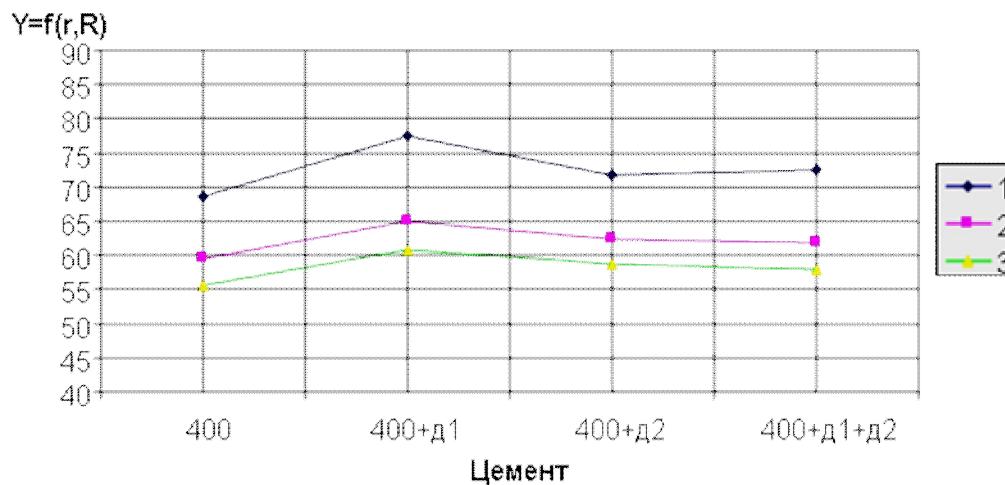


Рис. – Графические зависимости для определения приведенной активности цементов с добавками по результатам испытаний стандартных балочек на изгиб ( $r$ ) и сжатие ( $R$ ):

$$1 - \frac{R + r}{2}; 2 - \sqrt{R \cdot r} + \frac{R}{r}; 3 - \sqrt{R \cdot r}.$$

Переход от шести измерений к девяти при том же коэффициенте вариации уменьшает, согласно распределению Стьюдента, допуск определяемой величины с надежностью 0,9 в 1,3 раза [4].

**Выводы.** Следовательно, используя промышленные отходы мы можем повысить характеристики вяжущего, а следовательно и бетона, при этом уменьшить размеры отвалов и улучшить окружающую природную среду. Учитывая приведенную активность, которая является представительной характеристикой активности цемента, обеспечим более четкую связь с прочностью бетона.

**Список литературы:** 1. Баталин Б.С. Вред и польза шлаковых отвалов / Б.С. Баталин // Природа. – 2003. – № 10. 2. Меркин А.П. Новые технологические решения в производстве ячеистых бетонов / А.П. Меркин, М.И. Зейфман // Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. – 1982. – Вып. 2. – С. 28 – 32. 3. Сулковский И.А. Подбор состава бетона и управление его производством / И.А. Сулковский. – Ташкент: ФАН, 1980. – 135 с. 4. Дворкин О.Л. Проектирование и анализ эффективности составов бетона: [монография] / [О.Л. Дворкин, Л.И. Дворкин, М.В. Горячих, В.Н. Шмигальский]. – Ровно: НУВГП, 2009. – 177 с.

Поступила в редакцию 14.06.11

**Э.С. ГЕВОРКЯН**, докт. тех. наук, проф., УкрГАЖТ, Харьков

**В.А. ЧИШКАЛА**, канд. техн. наук, доц., ХНУ им. В.Н. Каразина

**О.М. МЕЛЬНИК**, аспирант, УкрГАЖТ, Харьков

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ  
ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА  
ЦИРКОНИЯ ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ С ПРЯМЫМ  
ПРОПУСКАНИЕМ ТОКА**

Розглядаються питання структуроутворення при гарячому пресуванні нанопорошків частково стабілізованого діоксиду цирконію, досліджуються деякі особливості кінетики зростання нанозерен і консолідації матеріалу. Встановлені особливості впливу температури і часу гарячого пресування. на розмір зерен і процеси ущільнення.

Рассматриваются вопросы структурообразования при горячем прессовании нанопорошков частично стабилизированного диоксида циркония, исследуются некоторые особенности кинетики роста нанозерен и консолидации материала. Установлены особенности влияния температуры и времени горячего прессования. на размер зерен и процессы уплотнения.

The questions of gelatin are examined at the hot pressing nanopowders of partly steady-state dioxide of zirconium, some features of kinetics of growth are probed nanograins and consolidation of material. The features of influence of temperature and time of hot-pressed are set, on the size of grains and processes of compression.

В настоящее время применяются эффективные методы, позволяющие спекать порошки различных тугоплавких материалов, при этом обеспечивая получениеnanoструктурных материалов [1, 2].

Тетрагонально-моноклинное превращение мелкодисперсных частиц  $ZrO_2$  применяется как технологический прием для создания микротрециноватой структуры при изготовлении керамики. В этом случае характеристики керамики повышаются в результате рассеивания упругой энергии развивающейся трещины в образовавшихся микротрещинах. При этом важным фактором является формирование в структуре материала очень мелких, равномерно распределенных трещин [3, 4].

Для создания контролируемых микротрещин в керамических композитах используется вторая фаза с термическим коэффициентом линейного рас-

ширения (ТКЛР) меньшим, чем у матрицы. Это приводит к росту термостойкости и снижению прочности материала. Если же в качестве второй фазы используются частицы  $ZrO_2$ , способные к тетрагонально-моноклинному превращению, то создаваемые при этом напряжения сжатия значительно выше напряжений растяжения в матрице, обусловленных различием ТКЛР, поэтому микрорастескивание происходит даже в случае очень малого размера частиц  $ZrO_2$ .

Образование и соединение микротрешин мельчайшего размера не снижает прочность материалов, так как в этом случае микрорастескивание обусловлено механизмом рассеивания энергии разрушающей трещины в микротрешинах. При правильном выборе компонентов, когда все частицы диоксида циркония являются центрами зарождения микротрешин, существует возможность создания таких внутренних напряжений, которые позволяют одновременно значительно повысить показатели прочности и трещиностойкости [5, 6]. При концентрации диоксида циркония выше оптимального значения происходит объединение микротрешин, что снижает способность рассеивать энергию.

Мартенситные превращения в поле напряжений вблизи растущей трещины приводят к заметному упрочнению двухфазной керамики. Возникающая в керамике трещина, распространяясь с высокой скоростью, при выходе в область тетрагональной фазы  $ZrO_2$  мгновенно переводит ее в моноклинную с увеличением объема. Вследствие этого распространение трещины прекращается. Кроме того, в зонах существования метастабильных тетрагональных фаз происходит сдвиговые деформации, приводящие к большой концентрации напряжений сжатия, что затрудняет развитие трещины и останавливает ее. В трансформационное упрочнение керамики вносит вклад даже то, что мартенситные превращения имеют недиффузионный характер и сопровождается искажением формы кристаллической решетки [4, 5].

В работах [7, 8] рассмотрен тетрагонально-моноклинный переход  $ZrO_2$  с позиций термодинамики и показано, что наличие или отсутствия превращения является результатом энергетического равновесия между изменениями свободной энергии, которая зависит от наличия стабилизирующих добавок, модуля упругости матрицы и размера частиц  $ZrO_2$ . Чем выше модуль упругости матрицы, меньше ее пористость и разница коэффициентов термического расширения, тем сильнее противодействует матрица тетрагонально-моноклинному превращению.

Исходя из приведенных литературных данных, нами была выбрана исходная композиция  $ZrO_2 + 3$  мол. %  $Y_2O_3$ . Материалы, полученные из порошков указанного состава методом спекания под давлением, будут обладать высокими физико-механическими характеристиками: пределом прочности при изгибе, ударной вязкостью и химической инертностью.

Для получения керамического материала мы использовали порошок  $ZrO_2 + 3$  мол. %  $Y_2O_3$ . Характеристики порошка следующие: фазовый состав – 2 % моноклинной фазы + 98 % тетрагональной фазы, размер частиц – 21 – 28 нм.

Рентгенограмма нанопорошков приведена на рис. 1.

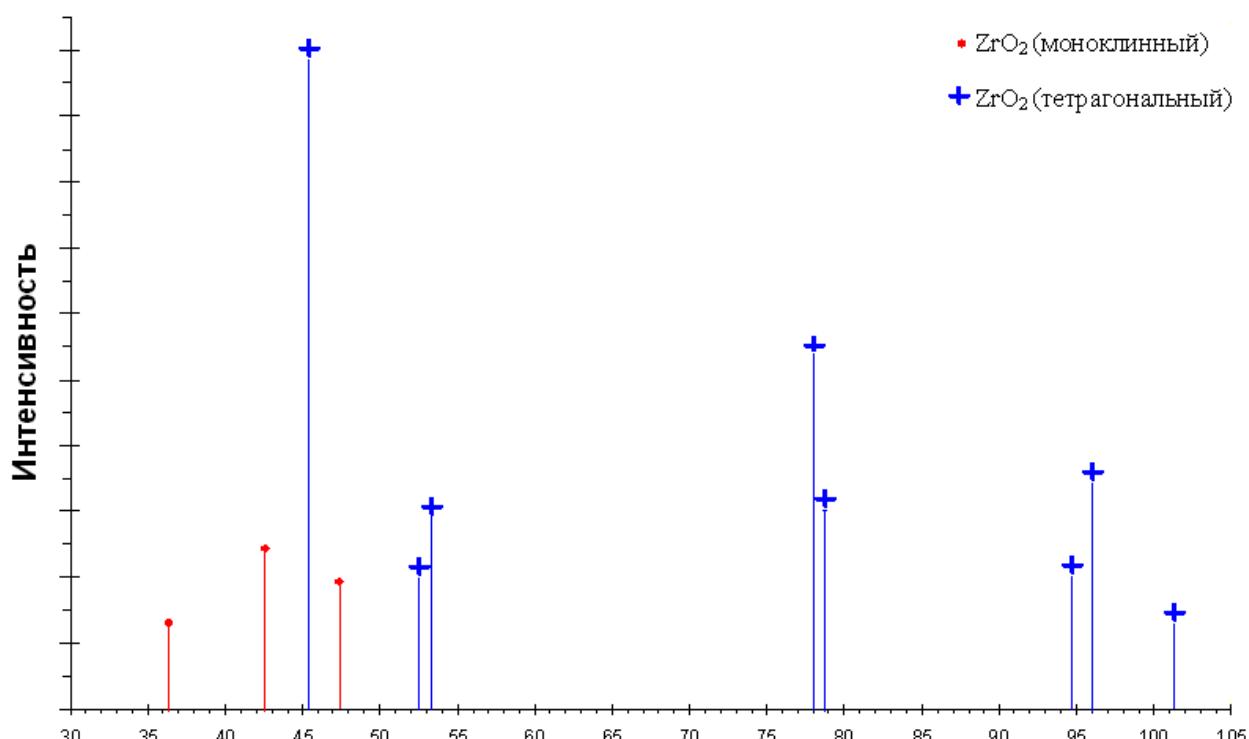


Рис. 1. Рентгенограмма спеченного при 1050 °C образца  $ZrO_2 + 3$  % мол.  $Y_2O_3$

Спекание под давлением проводили на лабораторной установке ООО «Кермет-У», исследование микроструктуры опытных образцов на электронном микроскопе JSM-840, плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания.

Общепринято, что чем выше давление прессования и ниже температура спекания и время выдержки, тем меньше будет окончательный размер зерен. Поэтому горячее прессование предварительно таблетированных образцов проводили при максимально возможном давлении 45 МПа и минимальных временах выдержки и температуры.

Эксперименты были проведены в широком интервале температур (1050 – 1600 °C) и времени выдержки (до 30 мин.) с целью получения материалов высокой плотности и минимального размера зерна.

При данных параметрах горячего прессования нами были получены материалы плотностью ~ 99 % теоретической и выше.

Проведенная оптимизация режимов горячего прессования на основе исследования микроструктуры опытных образцов показало, что оптимальным является время выдержки 2 минуты.

При температурах 1270 °C и выше происходит значительный рост зерен в опытных образцах полученного керамического материала.

На рис. 2 приведена микроструктура опытного образца полученного при 1270 °C, давлении 45 МПа и выдержке 2 минуты. Размер зерна составлял до 20 мкм.

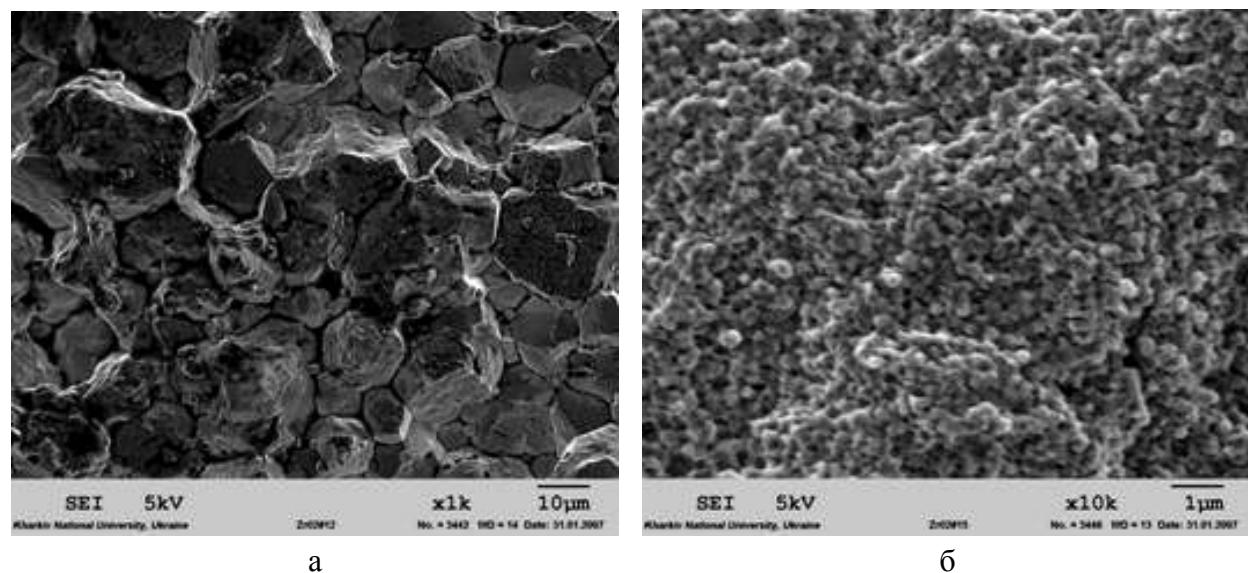


Рис. 2. Структуры керамических материалов состава ( $ZrO_2$  – 3 мол. %  $Y_2O_3$ ), изготовленных горячим прессованием при температурах 1270 °C (а) и 1050 °C (б), при давлении 45 МПа и времени выдержки 2 мин.

Горячее прессование при температуре 1050 °C, давлении 45 МПа и выдержке 2 минуты позволило получить опытные образцы практически моно-дисперсные с размерами зерен 250 – 300 нм (рис. 1), что позволяет предполагать наличие высоких физико-механических характеристик материала.

Как видно из рис. 2б кристаллическая структура характеризуется равномерным распределением величин зерен со значениями 250 – 300 нм и вязким характером разрушения.

Упрочнение материалов из частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ) основано на создании ультрадисперсной структуры в керамике с высоким содержанием тетрагональной фазы, способной претерпевать превращение в моноклинную под действием механических напряжений на острие трещины с увеличением ее объема [5]. Это приводит к закрытию трещины. Для ее дальнейшего развития необходимо приложение дополнительных механических напряжений, что повышает прочность изделий. Такой механизм возможен только в случае, если в керамике после обжига сохраняется размер кристаллов менее 1 мкм, поскольку тетрагональный твердый раствор  $\text{Y}_2\text{O}_3$  в  $\text{ZrO}_2$  является метастабильным. При превышении указанного размера кристаллов происходит резкое разупрочнение материала из-за перехода тетрагональной фазы в моноклинную, т.е. наблюдается полиморфный переход с увеличением объема.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают возможность получения высокоплотной керамики из частично стабилизированного диоксида циркония с величиной зерен меньше одного микрона, с использованием метода горячего прессования наноразмерного порошка состава ( $\text{ZrO}_2$  – 3 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) при температурах  $\sim 1050$  °С, давлении 45 МПа и времени выдержки 2 мин.

**Список литературы:** 1. Геворкян Э.С. Горячее прессование нанопорошков монокарбида вольфрама при нагревании электрическим током / [Э.С.Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.А. Чишака и др.] // Наноструктурное материаловедение. – 2006. – № 2. – С. 46 – 51. 2. Пат. 6617271 США, МПК C04B35/36. Tungsten carbide cutting tool materials / Kodash V.Y., Gevorkyan E.S. – Заявл. 08.09.03; опубл. 17.03.05. 3. Дудник В. Спекание ультрадисперсных порошков на основе диоксида циркония / [В. Дудник, В.А.Зайцев, А.В. Шевченко и др.] // Порошковая металлургия. – 1995. – № 516. – С. 43 – 52. 4. Evans A.G. Review – transformation toughening in ceramics: martensitic transformation in crack – tip stress fields / A.G. Evans, A.H. Heuer // J. Amer. Ceram. Soc. – 1980. – Vol. 63, № 5 – 6. – P. 241 – 248. 5. Wen S. Transformation electron microscopic observation of the martensitic phase tetragonal  $\text{ZrO}_2$  / [S. Wen, I. Ma, J. Guo at al.] // J. Amer. Ceram. Soc. – 1986. – Vol. 69, № 7. – P. 570 – 572. 6. Simha N. Shaer-induced transformation toughening in ceramics / N. Simha, L. Truskovski //Acta Metall. – 1994. – № 42. – P. 3827 – 3836. 7. Garvie R.C. Thermodynamics of the tetragonal to monolithic phase transformation in constrained zirconia microcrystals / R.C. Garvie, M.V. Swain // J. Mater. Sci. – 1985. – Vol. 20, № 3. – P. 1193 – 1200. 8. Lange F.F. Transformation toughening: 1, Size effects associated with the thermodynamics of constrained transformations / F.F. Lange // J. Mater. Sci. – 1982. – Vol. 17. – P. 225 – 234.

Поступила в редакцию 25.06.11

**I.O. СОЛОВІЙОВА**, аспірант, НМетАУ, Дніпропетровськ,  
**В.В. ПІСЧАНСЬКА**, канд. техн. наук, доц., НМетАУ, Дніпропетровськ,  
**О.С. НАУМОВ**, канд. техн. наук, доц., НМетАУ, Дніпропетровськ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗЕРНОВОГО СКЛАДУ КАРБІДУ КРЕМНІЮ НА ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОЦЕМЕНТНОГО БЕТОНУ СИСТЕМИ $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$

Проведено експериментальні дослідження щодо вивчення впливу гранулометричного складу карбіду кремнію на властивості низькоцементного бетону. В результаті виконаних досліджень встановлено доцільність використання у складі бетонних мас для футеровки жолобів доменних печей карбіду кремнію з розміром зерен менше 1 мм при переважному вмісті зерен фракцій 0,5 – 0,063 мм і 0,063 – 0 мм, що забезпечує формування низькопористої механічно міцної структури в умовах високих температур.

Проведены экспериментальные исследования относительно изучения влияния гранулометрического состава карбида кремния на свойства низкоцементного бетона. В результате выполненных исследований установлено целесообразность использования в составе бетонных масс для футеровки желобов доменных печей карбида кремния с размером зерен менее 1 мм при подавляющем содержимом зерен фракций 0,5 – 0,063 мм и 0,063 – 0 мм, что обеспечивает формирование низкопористой механически крепкой структуры в условиях высоких температур.

Experimental researches on studying influence of the grain composition of the silicon carbide on the properties of low-cement corundum concrete have been carried out. As a result of carried out researches the expediency of using silicon carbide in the composition of concrete mass for lining of blast furnaces troughs with grain size less than 1 mm and preferable 0,5 – 0,063 mm and 0,063 – 0 mm. It provision of forming low-porosity mechanic strength structure under such conditions high temperature.

**Постановка проблеми.** Ефективними вогнетривкими матеріалами для монолітних футеровок жолобів доменних печей є неформовані вогнетривкі матеріали систем  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{SiC} - \text{C}$ : віброналивні і саморозтікаючі низько- й ультранизькоцементні бетони, керамобетони, набивні маси на керамоорганічних зв'язках [1 – 8]. Сумісне введення у склад бетонних мас добавок вуглецьвміщуючих матеріалів і карбіду кремнію або карбідкремнійвміщуючих матеріалів сприяє підвищенню шлакостійкості, термостійкості, ерозійної та корозійної стійкості футеровок [5, 7 – 10].

Практичний досвід розробки багатокомпонентних складів і технології виготовлення низькоцементних бетонів системи  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$  свідчить про

індивіуальну залежність реологічних характеристик мас і фізико-хімічних властивостей бетону від виду і зернового складу заповнювача, кількості і мінералогічного складу алюмінаткальцієвого цементу, природи і вмісту мінеральних і водоредуючих добавок (мікрокремнезем, реактивний глинозем, дефлокулянти, пластифікатори), параметрів термічної обробки, які забезпечують формування щільної і міцної та шлакостійкої структури бетону.

Важливим фактором, що впливає на високотемпературні процеси спікання, синтезу нових фаз і формування міцної низькопористої структури бетонів, є окислення вуглецьвміщуючих компонентів і карбіду кремнію. Оскільки окислення карбіду кремнію протікає по поверхні зерен, то інтенсивність цього процесу певною мірою визначається розміром зерен, і вибір раціонального гранулометричного складу карбіду кремнію має важливе значення для технології отримання низькоцементних бетонів системи  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$  з комплексом заданих фізико-хімічних показників властивостей.

**Аналіз останніх досліджень.** Відомо застосування у складі полімінеральних бетонних сумішей низькоцементних вогнетривких бетонів карбіду кремнію або карбідкремнійвміщуючого регенерату з розміром зерен 3 – 0 мм, причому зерновий склад останнього представлено переважно зернами фракції 2,5 – 1 мм, 1 – 0,5 мм і 0,5 – 0,063 мм [7]. Згідно до розробки [11] рекомендовано використання карбіду кремнію фракції менше 150 мкм при співвідношенні зерен фракцій 100 – 150 мкм і менше 50 мкм, як 3 : 1.

Використання у складі карбідкремнієвого бетону порошків чорного карбіду кремнію різної дисперсності дозволило отримати бетон, в якому в результаті високотемпературних процесів на поверхні дрібнодисперсних зерен карбіду синтезується речовина з окисленого  $\text{SiC}$  і скла кальційалюмінатного складу, яка цементує структуру бетону і запобігає подальшому окисленню зерен  $\text{SiC}$  [5]. Авторами [12] запропоновано механізм утворення при температурі 1300 °С евтектичного розплаву, який є результатом взаємодії діалюмінату кальцію з  $\text{SiO}_2$  – продукту окислення  $\text{SiC}$ , що інтенсифікує формування керамічної структури бетонної маси внаслідок комбінованого спікання у твердій і рідинній фазі.

Таким чином, зерновий склад карбіду кремнію суттєво впливає на фізико-хімічні процеси структурно-фазових перетворень в бетонах в умовах температур служби і, як наслідок, визначає експлуатаційний ресурс монолітних футеровок жолобів доменних печей.

**Постановка задачі.** Метою проведеної роботи є визначення впливу гра-

нулометричного складу карбіду кремнію на змінення показників властивостей низькоцементних бетонів системи  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$  при температурах термообробки 110 °C, 1100 °C і 1450 °C.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проводили на зразках, які сформовані з бетонних мас вологістю 5,2 – 5,6 %, що містять 20 % карбіду кремнію і відрізняються вмістом зерен SiC фракцій 2 – 1 мм, 1 – 0,5 мм, 0,5 – 0,063 мм і менше 0,063 мм. Речовинний склад бетонних мас представлено в таблиці.

Таблиця  
Речовинний склад бетонних мас

Найменування компонентів	Номер складу			
	1	2	3	4
Електрокорунд фракції 6 – 0 мм	+	+	+	+
Цемент "Gorkal-70"	+	+	+	+
Реактивний глинозем	+	+	+	+
Вуглецьвміщуючий матеріал	+	+	+	+
Антиоксидант	+	+	+	+
Карбід кремнію:				
фракція 2 – 1 мм	+			
фракція 1 – 0,5 мм	+	+		+
фракція 0,5 – 0,063 мм		+	+	+
фракція менше 0,063 мм			+	+
Мінеральні та хімічні добавки пластифікаторів та дефлокулянтів	+	+	+	+

Експериментальні зразки-куби з ребром 70 мм виготовляли методом вібраційного формування в розбірні металеві форми при частоті 60 Гц, які після твердиння на повітрі протягом 2-х діб термообробляли при 110 °C, 1100 °C і 1450 °C з витримкою 24, 3 і 5 годин відповідно. Показники властивостей бетонів: уявну щільність і відкриту пористість, границю міцності при стиску визначали відповідно до вимог стандартів ГОСТ 2409-95, ГОСТ 4071.1-94.

Представлені на рисунку графічні залежності показників властивостей бетонних зразків від зернового складу SiC свідчать про суттєвий вплив максимального розміру зерен карбіду кремнію і співвідношення різних фракцій, що використовуються. Мінімальні значення уявної щільності бетону після сушки при 110 °C відповідають бетонним зразкам, що містять зерна карбіду кремнію крупних фракцій 2 – 1 мм, 1 – 0,5 мм (рисунку а). Зменшення розмі-

ру зерен SiC (склад № 2 і 3) позитивно впливає на підвищення уявної щільноті зразків до  $2,85 - 2,92 \text{ г}/\text{cm}^3$  і механічної міцності до  $41,3$  і  $46 \text{ H/mm}^2$  (рисунку в), зниження відкритої пористості на  $0,74 - 1,71 \%$  (рисунку б).

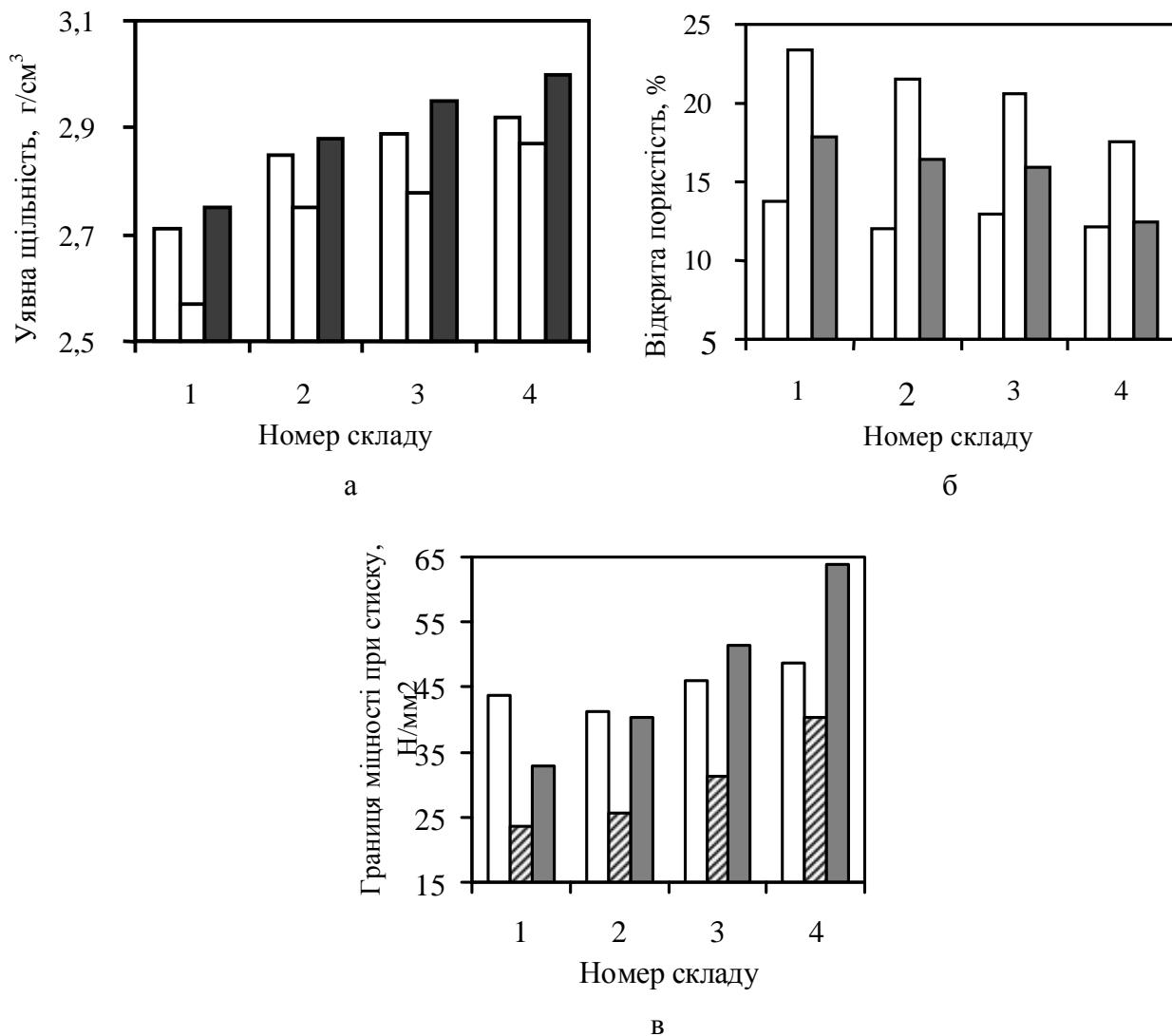


Рис. – Залежність уявної щільноті (а), відкритої пористості (б), границі міцності при стиску (в) бетону від зернового складу SiC, температура термообробки бетону:

□ –  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ■ –  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ■ –  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$

**Висновки.** В результаті проведених досліджень встановлено, що зменшення розміру зерен карбіду кремнію позитивно впливає на процеси ущільнення низькоцементних бетонів системи  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$  при вібраційному формуванні та забезпечує в умовах високих температур розвиток процесів фазо- та структуроутворення, які сприяють формуванню низькопористої міцної структури бетону.

На підставі отриманих експериментальних досліджень встановлено до-

цільність використання у складі карбідкремнійвміщуючого бетону карбіду кремнію з розміром зерен менше 1 мм при переважному вмісті і певному співвідношенні фракцій 0,5 – 0,063 мм і менше 0,063 мм.

**Список літератури:** 1. Аксельрод Л.М. Огнеупорные бетоны нового поколения в производстве чугуна и стали / Л.М Аксельрод // Огнеупоры и техническая керамика. – 1999. – № 8. – С. 35 – 41. 2. Звягин К.А. Применение низкоцементных тиксотропных корундовых бетонных смесей в агрегатах черной металлургии / К.А. Звягин, А.А. Бойкова // Огнеупоры и техническая керамика. – 2003. – № 10. – С. 20 – 21. 3. Шуляков Г.И. Опыт использования желобных масс различных марок в доменном производстве ОАО НЛМК / [Г.И. Шуляков, Э.М. Щеглов, С.С. Ляпин и др.] // Новые огнеупоры. – 2008. – № 9. – С. 8 – 11. 4. Рожков Е.В. Производство и служба высокоглиноземистых керамбетонов. Свойства и служба виброналивных масс на основе модифицированных ВКВС боксита в желобах доменных печей / [Е.В. Рожков, Ю.Е. Пивинский, М.З. Нагинский и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2001. – № 5. – С. 37 – 44. 5. Каменских В.А. Карбидкремниевые огнеупорные бетоны / [В.А. Каменских, И.Д. Кащеев, Н.А. Митюшев и др.] // Новые огнеупоры. – 2005. – № 12. – С. 36 – 39. 6. Сыртланов Р.Р. Опыт использования виброналивных керамбетонных масс в футеровке желобов доменных печей ОАО ЧМК / [Р.Р. Сыртланов, В.И. Антонов, В.Л. Андреев и др.] // Новые огнеупоры. – 2006. – № 4. – С. 83 – 85. 7. Борзов Д.Н. Разработка низкоцементных огнеупорных бетонов системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$  / Д.Н. Борзов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – № 4. – С. 83 – 87. 8. Крикунов Б.П. Применение корундокарбидкремниевой тиксотропной желобной массы производства ОАО "УкрНИИО им. А.С. Бережного" для изготовления и ремонта наливного рабочего слоя футеровки качающегося желоба доменной печи / [Б.П. Крикунов, А.И. Дрейко, Д.В. Колесников и др.] // Сб. науч. тр. ОАО "УкрНИИО им. А.С. Бережного". – 2009. – № 109. – С. 40 – 45. 9. Алтун А. Исследование коррозионного поведения самотечных бетонов в доменных шлаках / А. Алтун, С. Акпинар, Х. Пала // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 11 – 12. – С. 63 – 66. 10. Скуратов М.А. Литые (саморастекающиеся) керамбетоны. Растекаемость формовочных систем и некоторые свойства муллитокарбидкремниевых керамбетонов / М.А. Скуратов, Ю.Е. Пивинский // Новые огнеупоры. – 2001. – № 1. – С. 25 – 31. 11. Пат. 83754 Україна МПК7 C04B 35/66, C04B 35/10, C04B 33/22, C04B 14/32. Вогнетривка маса "NRG – БЕЛОКАМИТ – ДЖ" для футеровки жолобів доменних печей / Огородній Д.В., Романовський Л.Б. – № а200613925; заявл. 27.12.06; опубл. 11.08.08, Бюл. № 15. 12. Шевченко С.В. Повышение эффективности применения огнеупорных желобных масс в доменном цехе ОАО ММК / [С.В. Шевченко, А.Н. Никифоров, Л.Б. Новоселова и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2007. – № 11. – С. 32 – 34.

Надійшла до редколегії 19.07.11.

**И.А. ИВАХНЕНКО**, канд. техн. наук, доц., ОНПУ, Одесса,  
**Т.Н. ИВАХНЕНКО**, доц., ОДМА, Одесса

## **О СОСТАВЛЕНИИ ГЛАГОЛЬНЫХ КОНКРЕТИЗАЦИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

В даній роботі продовжено аналіз відомих станів, пропоновані правила складання ГК і проектування за їх допомогою технічних пристрій. Наведені приклади складання ГК і проектування технічних пристрій.

В данной работе продолжено анализ известных состояний, предлагаемые правила составления ГК и проектированию с их помощью технических устройств. Приведены примеры составления ГК и проектирования технических устройств.

The work offers rules for and gives examples of drawing up verbal specification (VC) and designing technical devices on their basis.

В работе [1] нами были предложены правила проектирования технических устройств (ТУ). Было предложено использовать для этого глагольные конкретизации (ГК). В ГК используются словесные описания состояний (С) технических устройств и предметов (ТУ и П) (ниже словесные описания будем называть описаниями, состояние ТУ и П – состоянием). Описание состояния это, в общем случае, множество глагольных словосочетаний (варить сталь; делать электрический ток и т.д.). В ГК имеет место следующее отношение состояний ТУ и П: чтобы делать А, надо делать Б, точнее, осуществлять А – это значит осуществлять Б или – осуществлять А можно осуществлением Б, где А – конкретизируемое состояние, а Б, в общем случае, известное множество конкретизирующих состояний.

Позднее нами предпринимались попытки использовать предложение для практического проектирования. Возникли сложности. В работах [2] и [3] был выполнен анализ известных состояний (их описаний), цель которого была – определить, какие описания состояний использовать в составе ГК . Предполагалось использовать для этой цели полные описания состояний, Но целесообразность этого вызывала определенные сомнения.

В предлагаемой работе продолжен анализ известных состояний (их описаний); предложены правила составления ГК и проектирования с их помо-

щью; приведены простые примеры составления ГК и проектирования (в объеме словесного описания проекта) с их помощью. Определена задача, которую следует решить, чтобы, используя приведенные здесь правила, осуществлять проектирование ТУ в полном объеме.

Состояния бывают в природе. Их можно осуществлять. Есть состояния – реально существующие, а есть их описания – модели, с помощью которых мы думаем о них, их обсуждаем и осуществляем. Между описаниями состояний и состояниями – однозначная связь: мы говорим: «состояние», подразумеваем его описание и наоборот [1]. Есть простые состояния, например:

размещать гвоздь в доске А, размещать гвоздь в доске Б, размещать доску А в положении ... относительно доски Б.

Люди заметили, что если осуществлять определенные множества состояний определенным образом, этим можно осуществлять другие состояния. В нашем примере – скреплять две доски. В работе [1] такое отношение состояний мы назвали глагольной конкретизацией (ГК). Последние там же предложили их записывать таблицами вида (табл. 1):

Таблица 1

Запись глагольных конкретизаций

1		
1	2	3
1 – скреплять две доски; 1.1, 1.2 и 1.3 – приведенные в качестве примера состояния		

В работе [2] предложено правило двойного обозначения состояний – в таблице и вне её: 1 вне таблицы обозначается так же – 1, состояния в нижней строчке – 1, 2, и 3 вне таблицы обозначаются 1.1; 1.2 и 1.3, соответственно. Здесь и ниже обозначения состояний вида 1 и С1, 1.1 и С1.1 и т.д. будем считать эквивалентными (С в составе обозначений обозначает «состояние»).

Назовем новые состояния – сложными (сложенными из простых). Тогда простые состояния определим так – простые состояния это те, которые не могут быть представлены сложными (конкретизируемыми), т.е., которые не могут осуществляться другими состояниями (вообще или в пределах данного проекта).

Сложные состояния, которые могут осуществляться только простыми, будем называть сложными состояниями первого уровня сложности.

Аналогично, заметили, что если осуществлять определенные множества состояний 1-го уровня сложности, то этим можно осуществлять другие (уже относительно них) состояния. Такое отношение состояний можно предста-

вить таблицей вида (табл. 2):

Таблица 2  
Соотношение состояний ГК

		1	
1		2	
1	2	1	2

В табл. количество конкретизирующих состояний выбрано произвольно. Будем их (новые состояния) называть сложными состояниями второго уровня сложности и т.д. Мы принимаем, что каждое табличное описание сложного состояния заканчивается простыми состояниями.

К сложным состояниям относятся, например, следующие состояния: производить пар; производить бензин; делать электрический ток.

Отметим, что согласно [1], табл. 1 и 2 являются табличными описаниями вариантов проекта ТУ, предназначенных для осуществления состояний, обозначенных в их первых строчках.

Бывают состояния, будем их называть: активные и пассивные.

Первые могут осуществляться сами или своими конкретизациями (их можно осуществлять непосредственно или осуществлением их конкретизаций), в конечном итоге, простыми состояниями. Вторые, например, ограничивают (накладывают условия на) осуществление первых. Например: размещать гвоздь в доске (активное С); выполнять условие: гвоздь должен быть перпендикулярным поверхности доски (пассивное С).

Есть такие множества состояний, где состояния связаны между собой физически – по законам природы. Полное множество таких состояний будем обозначать СФС (Связанные Физически Состояния)

Пример 1. Пусть С1 – размещать предмет х в положении ... относительно предмета у. Но известно, что если предметы имеют массу, а мы рассматриваем именно такой случай, тогда имеют место (осуществляются) следующие состояния: С2 – взаимодействовать предметам х и у гравитационно; С3 – притягивать предмет х предметом у силой; С4 – притягивать предмет у предметом х силой и др.

Пример 2. Пусть С1 – делать электрический ток в контуре. Известно, что такое состояние может иметь место (быть), согласно законам физики, если, в частности, осуществляются следующие состояния: С2 – вращать часть контура (в школьной физике она называлась «рамкой») в полости; С3 – делать (создавать) магнитное поле в полости и т. д. Здесь говорится о двух множест-

вах СФС. В составе первого С1, С2 и С3, второе представлено только С3.

В множества СФС входят и механическое напряжение в деталях ТУ в ответ на их деформацию и сила упругости пружины и химическое взаимодействие веществ и многое другое.

Особенности СФС:

1) состояния в составе одного и того же множества СФС не равнозначны между собой;

2) они не могут быть в природе и, соответственно, в технике иначе как в полном составе.

3) в их составе есть состояния, которые могут осуществляться технически непосредственно или посредством осуществления своих конкретизаций (активные С), а есть такие, которые осуществляются посредством осуществления первых (пассивные С). Например, в Примере 1 к первым относится С1, остальные – ко вторым; в Примере 2 к первым относятся С2, а С1 и С3 – ко вторым (причем, для С3, соответствующее ему первое здесь не приводится).

Так как «вторые» являются обязательными спутниками «первых» то в составе ГК и табличном описании проекта их можно не приводить, но они должны в полном объеме учитываться в расчетной его части.

Бывают состояния полноопределенные (состояния, которым соответствует их полное описание).

Представляется понятным, что полным описанием сложного состояния является описание всех конкретизирующих его состояний до простых, включительно и их отношения. Т.е., всех состояний, обозначенных в его табличном описании – таблице вида табл. 1 или 2 и их отношения. Табличное описание некоторого сложного состояния является его полным описанием и, как отмечалось, табличным описанием проекта варианта ТУ, предназначенного для его осуществления.

Бывают краткие описания состояний. Их примеры приводятся выше.

Есть состояния – полноопределенные в общем виде, а есть – полноопределеные конкретно. В первом случае вместо точных, в частности, количественных характеристик состояний приводятся их обозначения. В качестве последних могут использоваться их наименования (температура, положение в пространстве, давление и др.). Во втором случае в составе описания приводятся все точные характеристики состояния. Мы используем термин «точные характеристики» т.к. имеем в виду не только численные значения величин, но и химические формулы, обозначения марок стали, наименования графиче-

ских фигур, графические модели ТУ и др.

Представляется понятным следующее.

Краткоопределенному в общем виде состоянию (например, производить пар) может соответствовать определенное множество вариантов полноопределенных в общем виде состояний (ТУ и их проектов). В свою очередь, каждому варианту полноопределенных в общем виде состояний может соответствовать множество вариантов полноопределенных конкретных состояний (рисунок).

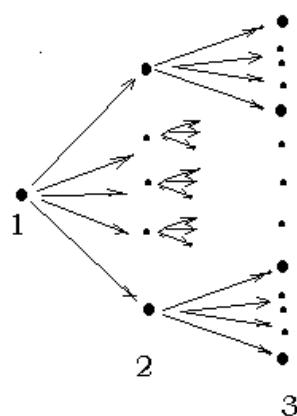


Рис. – Варианты полноопределенных конкретных состояний:

- 1 – краткоопределенное в общем виде состояние;
- 2 – полноопределенные в общем виде состояния;
- 3 – полноопределенные конкретные состояния.

В предыдущих публикациях предполагалось использовать в составе ГК полные описания состояний. Теперь мы знаем, что полные описания сложных состояний – это, по существу, описание вариантов проекта ТУ. Отсюда следует, что полные описания сложных состояний для составления ГК использовать нецелесообразно, так как для такого проектирования придется составить (описать) все возможные варианты проектов всех вариантов ТУ в общем виде. Как будет показано ниже, оказалось возможным, использовать для этой цели полные в объеме ГК описания состояний. Но сначала обратим внимание на следующее.

О моделировании состояний предметов. Тот или иной предмет может быть задан исчерпывающе – полным набором его характеристик. Например, геометрическая фигура – треугольник может быть задан (определен) длинами всех сторон, размерами всех углов и всеми другими его характеристиками, а может быть задан необходимым минимальным набором данных, необходи-

мых и достаточных для определения всех его характеристик с помощью известных геометрических правил, например, одной стороной и двумя углами. Аналогично, состояние предмета, например, растянутой пружины может быть задано исчерпывающее, в том числе и её формой, а может быть задано (определенено) минимумом данных, необходимым и достаточным для определения всех её характеристик с помощью известных законов и правил – так называемых, граничных условий.

Мы будем использовать оба способа определения состояния предметов. Отметим, что в большом числе задач проектирования та же форма пружины может быть определена соответствующими граничными условиями только на последних уровнях проектирования, так как граничные условия могут определяться и накапливаться (усложняться) в процессе проектирования – от уровня к уровню конкретизации состояний.

Рассмотрим иной, по сравнению с предложенным в [1], вариант записи ГК и проектирования с их помощью. Он отличается от первого тем, что вместо полных словесных описаний состояний в общем виде в составе ГК используются определенные множества их кратких словесных описаний в общем виде, эквивалентные их полным описаниям в объеме ГК. Суть варианта представим с помощью примера проектирования следующим образом.

1. Выбираем состояние, которые нам требуется осуществлять (для осуществления которого нам требуется спроектировать ТУ). Пусть это будет С1 – удерживать пружину цилиндрическую в растянутом состоянии. Здесь С1 является кратким описанием состояния в общем виде.

2. Записываем все известные состояния, которые уточняют С1 до определенного в общем виде. Эти состояния можно рассматривать как ответы на вопросы к С1: как удерживать, какую пружину, в как растянутом состоянии. Искомые «все известные состояния» будем записывать со следующим ограничением: в числе состояний, относящихся к глаголу, могут быть только те, которые относятся к главному слову первого состояния, в данном случае к слову (глаголу) «удерживать»: С2 – использовать пружину цилиндрическую с крючками на концах; С3 – выполнять условие: длина оси пружины должна быть больше её длины в ненагруженном состоянии; С4 – удерживать крючок х пружины в положении относительно её крючка у. Здесь и ниже обозначение предметов (крючков) буквами «х» и «у» используется для обозначения их отличия при использовании пружины.

Запишем полученное множество состояний в виде табл. 3.

Таблица 3

Запись множества состояний ГК

1	2	3	4
---	---	---	---

Отметим следующее: 1) описания состояний 2-го и 3-го дополняют (уточняют) описание 1-го; 2) С4 и С1 связаны при, так называемых, «прочих равных условиях» отношением односторонней равнозначности:  $C4 \Rightarrow C1$  (осуществлять С4 – значит осуществлять С1, но не наоборот); 3) множество кратких описаний 1, 2, 3, 4 эквивалентно полному описанию С1 в пределах ГК в общем виде.

Преобразуем последнюю таблицу к виду:

Таблица 4

Преобразование записи множества состояний ГК

1	2	3
4		

Допустим, что данная таблица является ГК, равнозначной ГК, предложенной в [1]. Тогда она должна удовлетворять следующему требованию: осуществлением состояний второго уровня конкретизации должны осуществляться состояния первого уровня. Но это так и будет, если принять, что С2 и С3 относятся не только к С1, но и к С4, т.е., описания состояний С2 и С3 как раз и являются упомянутыми «прочими равными условиями».

В табл. 4 – две характерные части – левая и правая. В левой приводятся краткие описания состояний, которые связаны отношением конкретизации (описания конкретизируемого и конкретизирующих состояний) В правой части приводятся описания состояний, уточняющих первые. Если состояния левой части таблицы могут осуществляться непосредственно или их конкретизациями, т.е., являются активными, то состояния правой части таблицы могут осуществляться осуществлением состояний её левой части, т.е., являются пассивными.

Аналогично, как для С1, запишем в табличном виде любой из известных вариантов множества состояний, которые уточняют С4 до определенного в общем виде в объеме ГК:

Таблица 5

Запись в табличном виде любого из известных вариантов множества состояний ГК

4	2	5	6	7
С5 – использовать скобу с двумя крючками; С6 – зацеплять крючок х пружины за крючок х скобы в положении; С7 – зацеплять крючок у пружины за крючок у скобы в положении				

Аналогично преобразованию табл. 3, последнюю таблицу преобразуем к виду:

Таблица 6

Преобразование множества ГК

4		2	5
6	7		

В табл. не выполняется правило односторонней равнозначности осуществления конкретизируемого и конкретизирующих состояний, так как последним преобразованием таблиц утрачена информация о положении крючков пружины относительно друг-друга. Для устранения указанного недостатка дополним правую часть таблицы кратким описанием С4, которое в данной части таблицы обозначает условие осуществления состояний её левой части:

Таблица 7

Дополнение записи множества состояний ГК кратным описанием С4

4		2	5	4
6	7			

Данная таблица является ГК С4 при указанных в ней условиях.

Аналогично, как для С1, запишем в табличном виде любой из известных вариантов множества состояний, которые уточняют С6 до определенного в общем виде в объеме ГК:

Таблица 8

Уточнение ГК С6

6	2	5	8	9
---	---	---	---	---

где: обозначения состояний 6, 2 и 5 см. выше; С8 – совмещать точку на поверхности крючка х пружины с точкой на поверхности крючка х скобы; С9 – выполнять условие: точки касания крючков х пружины и скобы должны быть на их внутренних поверхностях.

Последнюю таблицу можно преобразовать к виду:

Таблица 9

Преобразование зависимости С6

6	2	5	9
8			

В табл. не выполняется правило односторонней равнозначности осуществления конкретизируемого и конкретизирующего состояний, так как по-

следним преобразованием таблиц утрачена информация о положении крючков пружины и скобы друг относительно друга.

Для устранения указанного недостатка дополним правую часть таблицы кратким описанием С6, которое в данной части таблицы обозначает условие осуществления состояний её левой части.

Таблица 10

ГК С6

6	2	5		9	6
8					

Данная табл. является ГК С6 при указанных в ней условиях.

Аналогично последней табл. получим ГК С7 при указанных в ней условиях.

Таблица 11

ГК С7

7	2	5		11	7
10					
обозначения состояний 7, 2 и 5 см. выше; С10 – совмещать точку на поверхности крючка у пружины с точкой на поверхности крючка у скобы; С11 – выполнять условие: точки касания крючков у пружины и скобы должны быть на их внутренних поверхностях					

Подставим полученные ГК друг в друга и после сокращения равнозначных получим:

Таблица 12

Табличное описание варианта проекта ТУ в состоянии С1

1	2	3	5	4				
4								
6	7							
8	10				9	6	11	7

Данная табл. представляет собой табличное описание варианта проекта ТУ в состоянии С1.

Детальное описание проекта определяется состояниями последнего уровня конкретизации – состояниями, записанными на последней строчке левой части таблицы и в её правой части. В соответствии с полученными данными, проектируемое ТУ включает в свой состав цилиндрическую пружину с крючками на концах, скобу с крючками на концах. Крючки пружины и скобы касаются друг-друга в точке.

Известны (заданы) степень удлинения оси пружины, все её характеристики в ненагруженном состоянии (форма, размеры, материал и др.). Но все

другие, в том числе названные, но в проектируемом состоянии, точные характеристики ТУ (форма и размеры скобы, крючков скобы, их положение относительно скобы, точки касания крючков пружины и скобы и т.д.) заданы в общем виде, а некоторые из них – граничными условиями, т.е., не определены.

Рассмотрим еще один пример проектирования с использованием предложенного алгоритма построения ГК и проектирования с их помощью.

Составим таблицу, аналогично табл. 3 для С1:

Таблица 13

Запись множества состояний (2-ой пример) ГК

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 – удерживать пружину цилиндрическую в растянутом состоянии; 2 – растягивать пружину силами веса предмета x и реакции опоры; 3 – удерживать пружину за её крючок x опорой; 4 – крепить (удерживать) опору на предмете у в положении; 5 – прикреплять к крючку у пружины предмет x в положении; 6 – размещать предмет x около предмета у в положении; 7 – использовать предмет x; 8 – использовать предмет у; 9 – использовать опору; 10 – использовать пружину цилиндрическую с крючками; 11 – выполнять условие: длина оси пружины должна быть больше её длины в ненагруженном состоянии										

Преобразуем её в таблицу, аналогичную табл. 4.

Таблица 14

Преобразование записи множества состояний ГК

1			10	11	6	7	8	9
3	4	5						

Составим табл., аналогичную табл. 3 для С4 (описание состояния см. ниже).

Таблица 15

Состояние ГК С4

4	9	12	8
12 – устанавливать опору z на поверхности предмета у в положении			

Преобразуем последнюю табл. в табл., аналогичную табл. 4.

Таблица 16

Преобразование множества состояний

4	9	8
12		

Подставим табл. 16 в табл. 14. получим табл., аналогичную табл. 12, т.е., искомый фрагмент проекта.

Таблица 17

Искомый фрагмент проекта

1			10	11	6	7	8	9
3	4	5						

Ниже приведем еще один пример составления ГК и проектирования ТУ, аналогичный первому.

Таблица 18

Преобразованная запись множества состояний 3-го примера

1			2	3	4	5	1
6	7	8					

Таблица 19

ГК состояния С7

7	9	10
11		

Таблица 20

ГК состояния С8

8	10	12
13		

Таблица 21

Искомый фрагмент проекта

1			5	1	10	11	13
6	7	8					
9	12						

Табл. 18, 19 и 20 – ГК;

Табл. 21 – фрагмент проекта ТУ: 1 – размещать предмет x в положении относительно предмета y; 2 – использовать опору; 3 – использовать пружину цилиндрическую; 4 – использовать предмет x; 5 – использовать предмет y; 6 – удерживать опору на предмете y в положении; 7 – удерживать пружину опорой за конец x; 8 – удерживать пружиной, концом y предмет x; 9 – использовать опору с крючком; 10 – использовать пружину цилиндрическую с концами – крючками x и y; 11 – сцеплять крючок опоры с крючком x пружины в положении; 12 – использовать предмет x с крючком; 13 – сцеплять крючок y пружины с крючком предметах в положении.

Табл. 21 представляет собой табличное описание ТУ в состоянии, определяемом С1.

Детальное описание фрагмента проекта определяется состояниями последнего уровня конкретизации – состояниями, записанными на последней строчке левой части таблицы и в её правой части. В соответствии с полученными данными, проектируемое ТУ включает в свой состав предметы  $x$  и  $y$ , цилиндрическую пружину с крючками на концах и опору с крючком. Предмет  $x$  соединен крючком с крючком  $x$  пружины, пружина крючком  $y$  соединена с опорой за её крючок.

Здесь могут быть известными (заданными) положение предметов друг относительно друга, а также все характеристики пружины и опоры в ненагруженом (свободном) состоянии (форма, размеры, материал и др.). Но все другие характеристики ТУ, а также названные в проектируемом состоянии (форма и размеры пружины, опоры, их крючков, их положение относительно друг–друга и т.д.) м.б. заданы в общем виде или граничными условиями, но не определены.

Как известно, задачей проектирования после получения (изготовления) описания проекта является определение его точных характеристик.

Отметим следующее. Известно, что возможность практического осуществления того или иного варианта словесного описания проекта зависит от возможности подобрать такие точные его характеристики, что они окажутся совместимыми, т.е., будут удовлетворять действующим в технике законам и правилам.

Для точного проектирования, в том числе для выбора его подходящего описания, с помощью ГК нужно разработать алгоритм, способный следующее:

- а) строить (составлять) все возможные варианты табличного описания проекта;
- б) перебирать все возможные варианты точных характеристик состояний для каждого варианта табличного описания проекта по п. а;
- в) определять точные характеристики ТУ, заданны граничными условиями для каждого варианта по п. б, в том числе графическую модель проектируемого ТУ;
- г) выбирать варианты описания ТУ и варианты их точных характеристик, удовлетворяющие условию совместности геометрической, механической, химической и, возможно, другим требованиям к проекту. Совместность характеристик здесь – удовлетворение действующих в технике законов и правил.

В статье выполнен анализ состояний ТУ. Он является дополнением к анализу состояний, выполненному в статьях [2] и [3]. Определены варианты отношения состояний, их полные словесные описания. Показана нецелесообразность использования в составе ГК полных словесных описаний состояний. Предложены новые форма ГК и способ их составления. Приведены примеры составления ГК и проектирования с их помощью.

Определено, что для выбора подходящего варианта описания проекта и его точных характеристик нужен специальный алгоритм.

**Список литературы:** 1. Ивахненко И.А. Об алгоритме проектирования технических устройств / И.А. Ивахненко, Т.Н. Ивахненко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – № 30. – С. 33 – 42. 2. Ивахненко И.А. О накоплении глагольных конкретизаций для проектирования технических устройств / И.А. Ивахненко, Т.Н. Ивахненко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 39. – С. 105 – 114. 3. Ивахненко И.А. К вопросу о накоплении глагольных конкретизаций для проектирования технических устройств / И.А. Ивахненко, Т.Н. Ивахненко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 45. – С. 79 – 86.

Поступила в редакцию 26.07.11

УДК 621.926.5:539.215:531.36

**К.Ю. ДЕЙНЕКА**, інженер, НУВГП, Рівне

## **ВСТАНОВЛЕННЯ УМОВ САМОЗБУДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА**

Визначений основний незбурений рух барабанного млина. Отримані умови стійкості сталого руху машинного агрегату млина і сдвигового перебігу зернистого внутрішньокамерного завантаження. Виявлені причини самозбудження пульсацій завантаження в поперечному перетині камери барабана, що обертається.

Определено основное невозмущенное движение барабанной мельницы. Получены условия устойчивости установившегося движения машинного агрегата мельницы и сдвигового течения зернистой внутрикамерной загрузки. Выявлены причины самовозбуждения пульсаций загрузки в поперечном сечении камеры вращающегося барабана.

The ball-tube mill unperturbed fundamental motion is established. The stability conditions of a mill machine steady-state motion and an intrachamber granular filling shifting flow are determined. The cause of self-excitation of filling pulsations in rotating chamber cross-section is advanced.

Новим технологічним напрямом радикального підвищення надзвичайно низької енергетичної ефективності барабанних млинів є активізація циркуляції завантаження шляхом надавання йому коливних рухів у камері. Доволі перспективним для практичного застосування видається удосконалення процесів подрібнення, на основі ефекту самозбудження автоколивань завантаження, на базі традиційних конструктивних рішень обладнання з барабаном без додаткових елементів, що піддаються прискореному зносу.

Нестійкі режими роботи барабанних млинів досліджувались низкою авторів. Було розроблено моделі вимушених коливань у приводі завантаженого барабана [1], фрикційних коливань при проковзуванні всього завантаження відносно поверхні камери [2], фрикційних коливань при проковзуванні всього завантаження відносно поверхні камери та пружних коливаннях приводу [3], фрикційних коливань при проковзуванні центральної малорухливої частини відносно решти завантаження [4] та фрикційних коливань внутрішніх шарів завантаження [5]. Однак застосування таких спрощених моделей фрикційних крутильних коливань зумовлює розбіжність одержуваних розрахункових результатів із експериментальними даними, скільки проковзування завантаження відносно поверхні камери практично відсутнє.

Попередні пошукові експерименти засвідчили, що пульсаційний рух завантаження в обертовій камері спричинено нестійкістю руху млина, як машинного агрегату. При встановленні умови стійкості руху системи найбільшу складність становило визначення основного незбуреного руху млина.

Завантажений барабан млина (рис. 1) розглядався як система сталого складу зі змінними інерційними параметрами – осьовим моментом інерції та положенням центра мас.

Вважалось, що змінність цих параметрів було зумовлена перерозподілом із відносним рухом мас завантаження на тілі барабана. У рівняннях руху враховувалась вся маса завантаження, не залежно від характеру взаємодії із барабаном.

На основі методів механіки відносного руху було отримано вирази для кінетичної енергії, головного вектора та головного моменту кількостей руху завантаженого барабана. Застосування принципу твердіння механічної системи істотно спростило отримання рівнянь руху завантаженого барабана:

$$M_n = I_z \frac{d\omega}{dt} + M_o, \quad M_o = m_z + M_{az}, \quad m_z = m_{kz} + m_{vz}, \quad M_{az} = -\rho g \int_w r_{vx} dw,$$

$$m_{kz} = -2\rho\omega \int_w (r_{vx}u_x + r_{vy}u_y)dw, \quad m_{vz} = -\rho \int_w \left( r_{vx} \frac{du_y}{dt} - r_{vy} \frac{du_x}{dt} \right) dw,$$

$$I_z = \rho \int_w (r_y^2 + r_z^2) dw,$$

де  $M_n$  – приводний крутячий момент,  $I_z$  – осьовий момент інерції завантаженого барабана,  $\omega$  – кутова швидкість барабана,  $t$  – час,  $M_o$  – момент опору завантаження обертанню барабана,  $m_z$  – момент реактивних сил завантаження,  $m_{kz}$  – момент реактивних корілісовых сил,  $m_{vz}$  – момент реактивних варіаційних сил,  $M_{az}$  – момент активних масових сил завантаження.

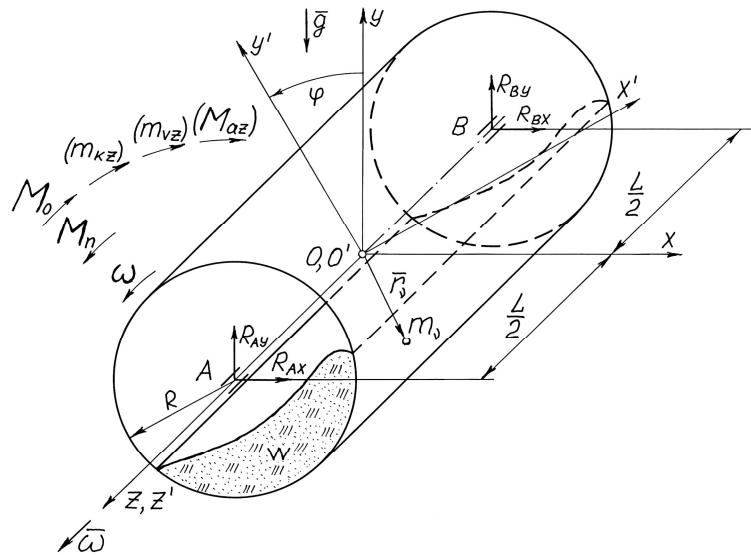


Рис. 1. Розрахункова схема завантаженого барабана

Було залучено рівняння Лагранжа другого роду для системи зі змінними інерційними параметрами із використанням принципу твердіння:

$$\frac{d^*}{dt} \frac{\partial^* T}{\partial \omega} - \frac{\partial^* T}{\partial \varphi} = M_e - m, \quad T = \frac{I\omega^2}{2},$$

де  $d^*$ ,  $\partial^*$  – знаки спеціальних похідних за принципом твердіння системи;  $M_e$ ,  $m$  та  $I$  – узагальнені (зведені) моменти зовнішніх, реактивних сил та осьовий момент інерції.

На основі використання принципу встановлення ієрархії змінних, було

прийнято гіпотезу про близькість руху системи до обертання із кутовою швидкістю, що повільно змінюється.

Динамічні та інерційні параметри завантаженого барабана вважались квазистатичними залежностями швидкості обертання, що дозволило одержати рівняння перехідного руху млина:

$$\left\{ \left[ \frac{\omega^2}{2} \frac{d^2 I_3(\omega)}{d\omega^2} + 2\omega \frac{d^* I_3(\omega)}{d\omega} + I_3(\omega) + I_\delta \right] \frac{1}{i^2 + I_\delta} \right\} \frac{d\omega}{dt} = M_\delta(\omega) - \frac{M_3(\omega) + M_\delta}{i\eta_k},$$

де  $I_3$ ,  $I_\delta$  и  $I_\delta$  – осьові моменти інерції завантаження, барабана та обертових частин двигуна;  $M_\delta$  – момент приводного двигуна;  $M_3$  – момент опору обертанню барабана;  $M_\delta$  – момент опору в опорах барабана;  $i$  та  $\eta_k$  – передаточне відношення та коефіцієнт корисної дії приводу.

На основі прямого методу Ляпунова було отримано умову асимптотичної стійкості усталеного руху машинного агрегату барабанного млина:

$$\frac{\frac{dM_3(\omega)}{d\omega} \frac{1}{i\eta_k} - \frac{dM_\delta(\omega)}{d\omega}}{\left[ \frac{\omega^2}{2} \frac{d^2 I_3(\omega)}{d\omega^2} + 2\omega_0 \frac{dI_3(\omega)}{d\omega} + I_3(\omega) + I_\delta \right] \frac{1}{i^2 + I_\delta}} > 0.$$

Екстремальне від'ємне значення другої похідної  $d^2 I_3(\omega)/d\omega^2$  може викликати від'ємне значення знаменника отриманої умови стійкості, а екстремальне від'ємне значення похідної  $dM_3(\omega)/d\omega$  – від'ємне значення всього чисельника умови.

Це може привести до невиконання умови та втрати стійкості руху.

Було прийнято, що автоколивання в камері обертового барабана спричинені інерційним режимом поведінки зернистого завантаження (рис. 2), що перебуває у стані зсувної течії (рис. 3).

Такий режим реалізується при невеликій густині середовища та великому зсуванні швидкостей.

За таких умов між елементами завантаження завжди виникають деякі зазори.

Взаємодія елементів здійснюється внаслідок їх безперервного зштовхування.

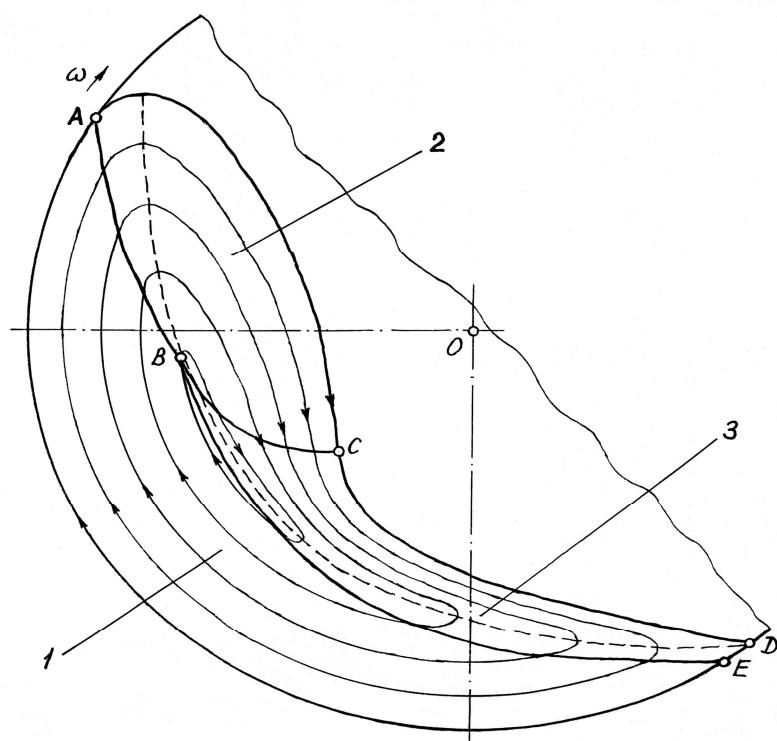


Рис. 2. Схема картини руху завантаження в перерізі камери обертового барабана:

- 1 – зона твердотільного руху,
- 2 – зона відокремлення та падіння,
- 3 – зона зсувного шару

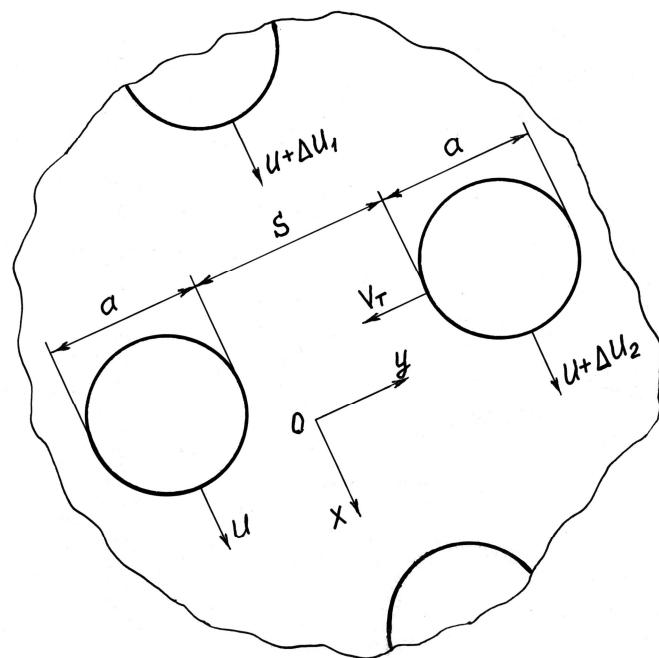


Рис. 3. Схема зсувного потоку завантаження в інерційному режимі

Дисперсна та несуча фази внутрішньомлининого завантаження розглядались, як суцільне середовище із осередненими параметрами, а математичне

описування руху багатофазної системи здійснювалось за допомогою осереднених величин.

На основі теорії швидких рухів зернистих середовищ як математичну модель завантаження було вибрано рівняння неньютонівської рідини, що нестискається. Було приблизно розв'язано вихідне рівняння вигляду:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad \text{де } P_{ij} = \left( p - \frac{1}{3} \eta \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} - \eta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

де  $\rho = \text{const}$  – масова густина,  $\vec{u}$  – середня (макроскопічна) швидкість,  $\vec{P}$  – тензор в'язких напружень,  $p$  – дисперсний тиск,  $\rho \vec{g}$  – об'ємна сила тяжіння,  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості.

Враховувались закони збереження маси, імпульсу та теплової енергії:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} &= -\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, & \rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) &= -\frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j}, \\ \frac{3}{2} \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - P_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - I, \end{aligned}$$

де  $T = v_T^2 / 3$  – температура середовища,  $v_T$  – середня швидкість хаотичного руху елементів (теплова швидкість),  $\kappa$  – коефіцієнт тепlopровідності,  $I$  – зменшення енергії хаотичного руху елементів внаслідок їх непруженого співударення.

Це дозволило отримати дисперсійне рівняння розглядуваної системи:

$$\beta^3 + (a_1 k^2 - b_1) \beta^2 + k^2 (c_1 k^2 - d_1) \beta - k^2 (e_1 k^2 + f_1) = 0,$$

де  $\beta = -i\omega$ ;  $\omega$  – збурення швидкості поперек площини зсуву;  $k$  – хвильове число;  $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$  – коефіцієнти, що визначаються характеристиками середовища.

Було встановлено (рис. 4), що рух завантаження млина в зоні відокремлення та падіння є стійким або нестійким по відношенню до малих збурень, що розповсюджуються перпендикулярно до площини зсування, в залежності

від середньої довжини вільного пробігу елементів або від дилатансії завантаження.

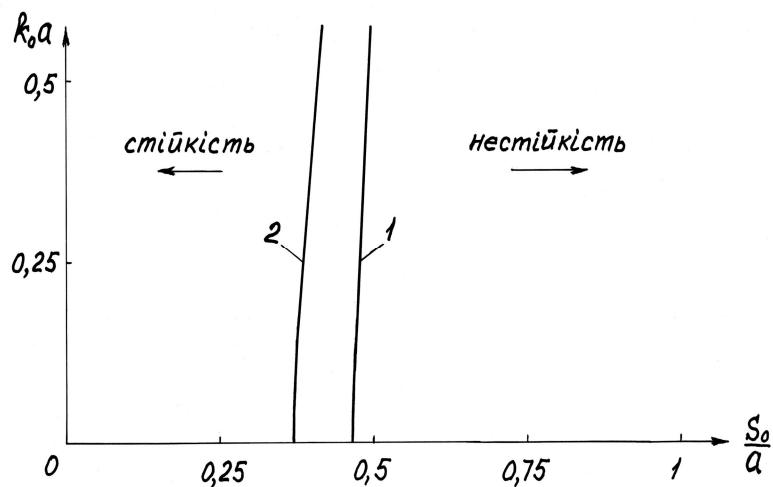


Рис. 4. Дисперсійні криві і схеми областей стійкого та нестійкого руху зернистого завантаження:

- 1 – дисперсійна крива для абсолютно жорстких елементів завантаження,
- 2 – дисперсійна крива для елементів, що деформуються, при демпфуванні.

При порівняно малій дилатансії рух завантаження є стійким, оскільки всі збурення з часом загасають у всьому діапазоні довжин хвиль. При дилатансії, більшій за критичну, такий рух є нестійким у деякому інтервалі хвильових чисел. Критичне значення дилатансії залежить від часу контактування при співударяннях елементів, що деформуються, зменшуючись зі зростанням часу контактування по відношенню до часу вільного пробігу. Показано, що демпфуючий вплив подрібнюваного матеріалу на взаємодію молотильних тіл підвищує час контактування елементів і посилює нестійкість руху.

Отже, чинниками пульсацій завантаження, що суттєво підвищують енергетичну ефективність процесів подрібнення в барабанних млинах [6], є варіації осьового моменту інерції і моменту опору обертанню, дилатансія та демпфуюча дія частинок подрібнюваного матеріалі на взаємодію молотильних тіл.

**Список літератури:** 1. Виноградов Б.В Динаміка барабанних млинів: монографія / Б.В. Виноградов. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2004. – 127 с. 2. Сланевский А.В. Челночное движение сыпучей среды во вращающихся печах и мельницах / [А.В. Сланевский, И.И. Лобунина, Л.Г. Берштейн и др.] // Цемент. – 1992. – № 4. – С. 55 – 61. 3. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий / Д.К. Крюков. – М.: Недра, 1966. – 174 с. 4. Марюта А.Н. Управление фрикционными колебаниями нагрузки барабанных мельниц с целью интенсификации измельчения трением / А.Н. Марюта // Пробл. трения и изнашивания. – 1988. – Вып. 34. – С. 18 – 28. 5. Новицкий И.В. Автоматическая оптимизация процессов самоизмельче-

ния руд в барабанных мельницах / И.В. Новицкий. – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 195 с. 6. Дейнека К.Ю. Создание рациональных режимов работы барабанных мельниц с автоколебательной внутрикамерной загрузкой / К.Ю. Дейнека // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010. – № 65. – С. 69 – 74.

*Надійшла до редколегії 25.07.11*

УДК 621.926.5:539.215

**Ю.В. НАУМЕНКО**, докт. техн. наук, доц., НУВГП, Рівне

## **СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО РЕЖИМУ РУХУ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА**

Запропонована модель реального трифазного режиму руху внутрішньокамерного завантаження обертового барабана. Показано, що картина руху завантаження в поперечному перетині камери містить, поряд з традиційною твердотілою і зоною скованого падіння, третю зону зсувного шару, що раніше не враховувалася. Встановлено, що основний процес тонкого подрібнення в барабанному млині здійснюється в зсувному шарі завдяки стиранню і роздавлюванню.

Предложена модель реального трехфазного режима движения внутрикамерной загрузки вращающегося барабана. Показано, что картина движения загрузки в поперечном сечении камеры содержит, наряду с традиционной твердотельной и зоной несвободного падения, ранее не учитывавшуюся третью зону сдвигового слоя. Установлено, что основной процесс тонкого измельчения в барабанной мельнице осуществляется в сдвиговом слое благодаря истиранию и раздавливанию.

The model of the actual rotating drum intrachamber filling three-phase flow is proposed. It is pointed out that the chamber cross-section filling flow patterns contain, among familiar solid-state and falling-down phases, the third shifting layer phase, which previously was not taken into account. It is established that the principal fine ball-tube milling is effected into a shifting layer owing to rubbing and crushing.

Процес подрібнення в барабанних млинах носить яскраво виражений випадковий характер. Описати його можна лише за допомогою узагальнених динамічних параметрів, що характеризують реалізацію способів подрібнення і повністю визначаються поведінкою завантаження в обертовій камері.

Хронологія використання барабанних млинів починає відлік від патенту 1891 року. Через декілька десятиліть було започатковано розвиток теорії робочих процесів таких млинів [1]. Надалі цю гіпотезу було покладено в основу

практично всіх існуючих методів розрахунку барабанних млинів [2 – 6].

Традиційна теорія базується на концепції ізольованого від оточуючого середовища окремого елемента завантаження камери, який рухається під дією лише масових сил ваги і відцентрової інерції та реакції обмежуючої поверхні. Взаємодія елементів між собою, зокрема внутрішнє тертя, не враховується. Вважається, що елементи завантаження захоплюються обертовим барабаном до моменту, коли сили ваги перевищують відцентрові сили, після чого ці елементи рухаються за параболами. Передбачається, що режим руху завантаження є двофазним «водоспадним», із твердотільною зоною і зоною підкидання та падіння в поперечному перерізі камери, а подрібнення здійснюється лише ударною дією при переході елементів завантаження з параболічних на колові траєкторії. Завдяки граничній спрошеності така модель дозволяє просту та всеобщу формалізацію параметрів руху ідеалізованого завантаження при розрахунку, зокрема траєкторій руху елементів із характерними точками на них, поверхонь переходу траєкторій, швидкостей елементів, оборотності циркуляції завантаження, моменту опору та потужності приводу завантаженого барабана.

Однак експериментальні дослідження виявили істотну розбіжність практичного застосування традиційної гіпотези із реальним режимом руху. Одержані результати свідчать про її непридатність для низьких швидкостей обертання. Порівняно із розрахунком має місце зменшення висоти падіння та дальності польоту елементів, непарараболічність їх траєкторій та розсіювання гравітаційного потоку. Висота ж падіння при відносній швидкості обертання  $\psi_\omega = 0,75$  не є максимальною. Крім того, пристінковий шар завантаження ще не починає утворюватись при критичній швидкості на поверхні камери.

Виявилось, що реальним режимом руху завантаження при роботі барабанних млинів є трифазний або змішаний. При цьому виникає третя зсувна зона руху, яка доповнює твердотільну та зону підкидання з падінням традиційного двофазного режиму. Тонке подрібнення здійснюється переважно стиранням та роздавлюванням у зсувному шарі.

Трифазний режим був предметом досліджень низки авторів [7 – 10]. Однак, внаслідок істотної складності задачі, достатньо універсальної методики розрахунку параметрів руху завантаження розроблено не було.

За мету роботи було поставлено побудову моделі реального трифазного режиму руху внутрішньомлинного завантаження.

За основу було прийнято уточнену трифазну схему усталеного руху за-

вантаження в поперечному перерізі стаціонарно обертової камери, що містить твердотільну зону руху без відносного пересування елементів завантаження та проковзування по поверхні камери I, зону невільного падіння II та зону зсувного шару III (рис. 1). Завантажений барабан обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  під дією моментів рушійних  $M_p$  та сил опору  $M_o$ .

Процес подрібнення переважно ударною дією здійснюється на межі ВС переходу між другою та третьою зонами. Основний процес подрібнення переважностиранням відбувається у верхній частині третьої зони при швидкій течії із значним зсувним градієнтом. Процес здрібнення переважно роздавлюванням виникає у нижній частині третьої зони при сповільненні потоку.

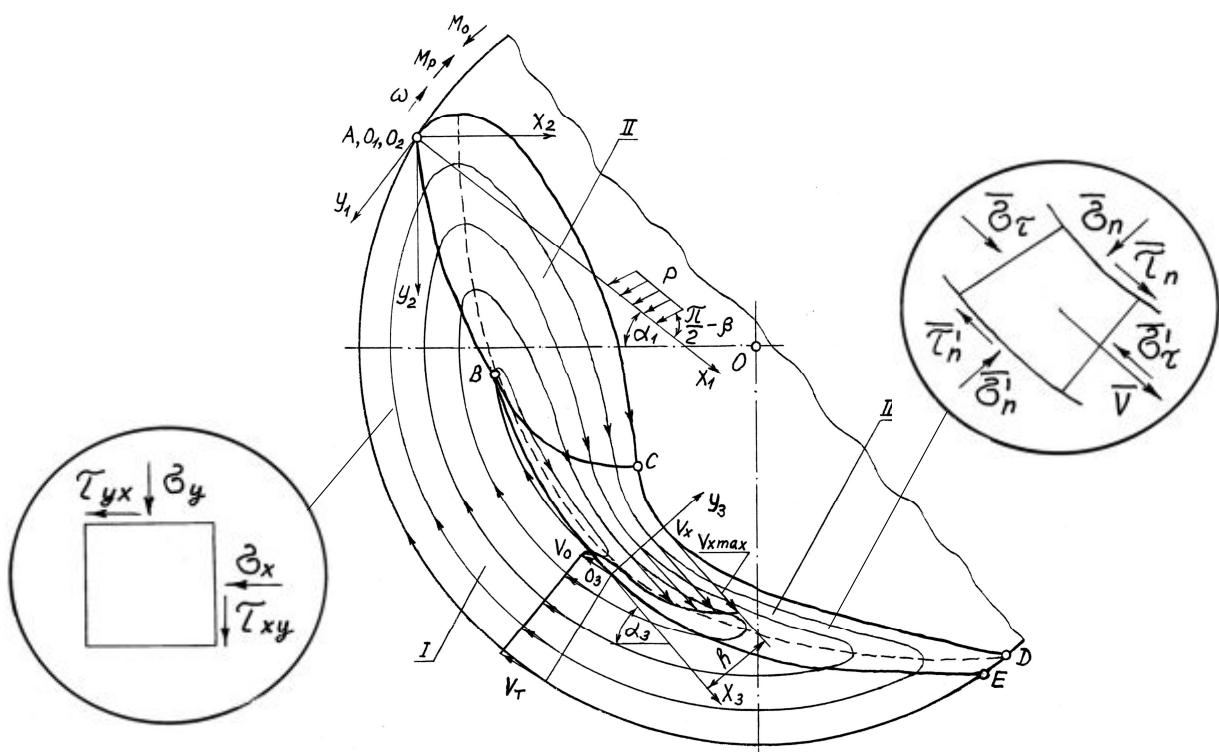


Рис. 1. Розрахункова схема руху завантаження в перерізі обертової камери

На основі розрахунку напруженого-деформованого стану завантаження було розв'язано задачі про визначення поверхні переходу між першою та другою зонами та руху зсувного шару в третій зоні [11].

Отримано залежності координат  $x$  та  $y$  лінії ковзання АВ у параметричній формі:

$$y = b \sin(\alpha - \varphi) \frac{\sin 2\Omega}{\sin \alpha \mp \sin \varphi \sin(2\Omega + \alpha)},$$

$$\begin{aligned}
x_{1,2} = & \frac{2b \sin \alpha \sin(\alpha - \varphi)}{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi} \left\{ \frac{[\pm \cos \varphi (\mp \sin \varphi) - \sin \alpha] \cos(2\Omega + \alpha)}{2[\sin \alpha + (\mp \sin \varphi) \sin(2\Omega + \alpha)]} + \right. \\
& + \frac{\pm \cos \varphi \sin \alpha - (\mp \sin \varphi)}{\sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi}} \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \left( \Omega + \frac{\alpha}{2} \right) + (\mp \sin \varphi)}{\sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi}} \right] - \\
& - \frac{[\pm \cos \varphi (\mp \sin \varphi) - \sin \alpha] \cos \alpha}{2[\sin \alpha + (\mp \sin \varphi) \sin \alpha]} - \\
& \left. - \frac{\pm \cos \varphi \sin \alpha - (\mp \sin \varphi)}{\sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi}} \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{2} \right) + (\mp \sin \varphi)}{\sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi}} \right] \right\},
\end{aligned}$$

де  $b = \frac{p}{\gamma} \frac{\sin \varphi \sin(\alpha - \delta)}{\sin \alpha \sin(\alpha - \varphi)}$ ,  $p$  – зведений тиск,  $\gamma$  – об’ємна вага завантаження,  $\alpha$  – кут нахилу вільної поверхні до горизонталі,  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя завантаження,  $\Omega$  – кут між напрямом максимального напруження  $\sigma_{\max}$  та віссю  $x$ .

Отримано, також, вирази для поточної  $V_x$  та середньої швидкості  $V_{xc}$  зсувного шару завантаження:

$$\begin{aligned}
V_x &= \sqrt{2W \sin \alpha \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} y - V_0^2}, \text{ де } V_x \leq 0 \text{ при } \left( 2W \sin \alpha \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} y - V_0^2 \right) \leq 0 \text{ та} \\
V_x &\geq 0 \text{ при } \left( 2W \sin \alpha \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} y - V_0^2 \right) \geq 0, \text{ } V_0 \text{ – усталена швидкість,} \\
V_{xc} &= \frac{|V_0^3| (1 - \sin \varphi)}{3hW \sin \alpha \cos \varphi} \left\{ \left[ \frac{2hW \sin \alpha \cos \varphi}{V_0^2 (1 - \sin \varphi)} - 1 \right]^{1.5} + 1 \right\}, \text{ } h \text{ – товщина шару.}
\end{aligned}$$

Вираз для уявного сумарного вертикального прискорення  $W$ :

$$\begin{aligned}
W &= \sqrt[3]{-\frac{L}{2} + \sqrt{f}} + \sqrt[3]{-\frac{L}{2} - \sqrt{f}} - \frac{q}{3}, \quad \text{де } f = \left( -\frac{q^2}{9} + \frac{m}{3} \right)^3 + \left( \frac{L}{2} \right)^2, \\
L &= 2 \left( \frac{q}{3} \right)^3 - \frac{qm}{3} - 2 \frac{V_0^6}{d^3}, \quad q = -\frac{1}{d^3} \left( \frac{V_{xc}^2}{c^2} + 3d^2 V_0^2 \right), \quad m = \frac{1}{d^3} \left( 2 \frac{V_{xc}}{c} |V_0^3| + 3d V_0^4 \right).
\end{aligned}$$

На рис. 2 наведено отримані типові залежності масових часток другої  $K_{ba}$ , третьої  $K_{za}$  та першої зони  $K_p$  від відносної швидкості обертання барабана  $\psi_\omega$  при відношенні середнього розміру елемента завантаження до діаметра камери  $d/D=0,01$  для різних ступенів заповнення камери  $\kappa$ .

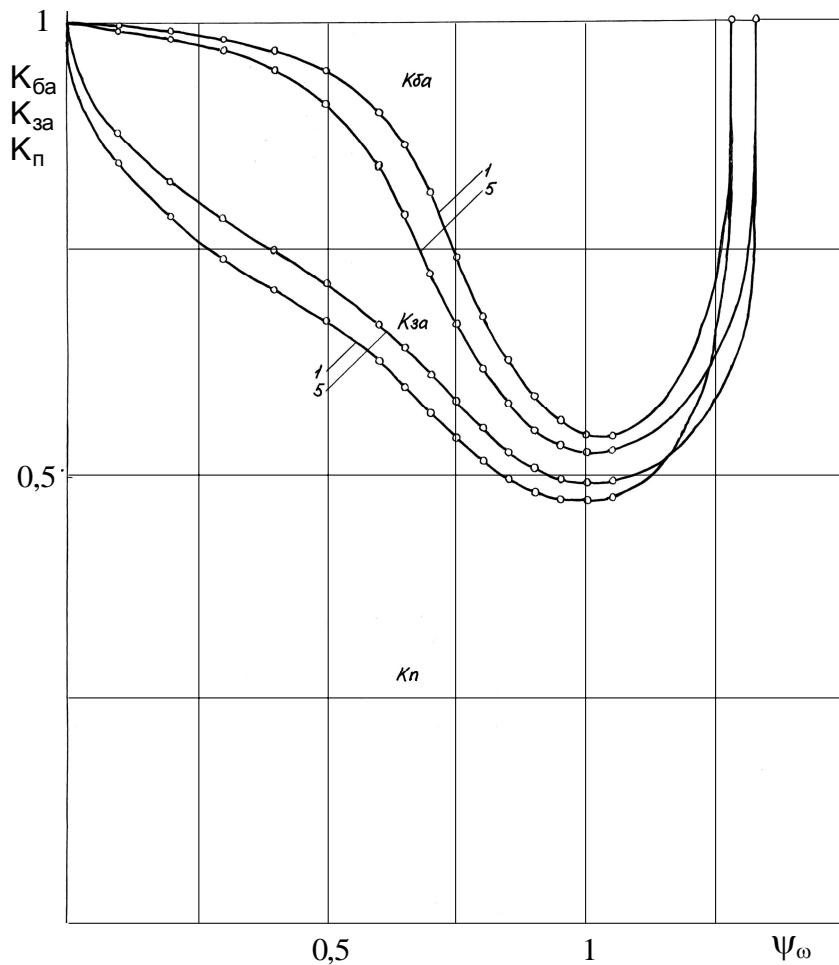


Рис. 2. Залежності  $K_{ba}$ ,  $K_{za}$  та  $K_p$  від  $\psi_\omega$  при  $d/D = 0,01$ :  
1 –  $\kappa = 0,25$ , 5 –  $\kappa = 0,45$ .

На рис. 3 наведено залежності оборотності завантаження  $K_o$ .

На основі отриманих результатів було встановлено діапазони параметрів реалізації раціональних режимів багатостадійного помелу [12]: для первого етапу грубого подрібнення переважно ударною дією –  $\psi_\omega = 0,85 - 1,05$ ,  $\kappa = 0,45$ ,  $d/D = 0,015 - 0,04$  (рис. 4а), для останнього етапу тонкого подрібненнястиранням та роздавлюванням –  $\psi_\omega = 0,25 - 0,45$ ,  $\kappa = 0,25$ ,  $d/D = 0,002 - 0,01$  (рис. 4б).

Таким чином, побудована модель дозволяє описати реальний трифазний режим руху завантаження, істотно уточнити характер реалізації способів подрібнення в робочій зоні та встановити раціональні параметри процесу бага-

тостадійного подрібнення в млинах барабанного типу на основі концепції енергетичної селективності дезінтеграції.

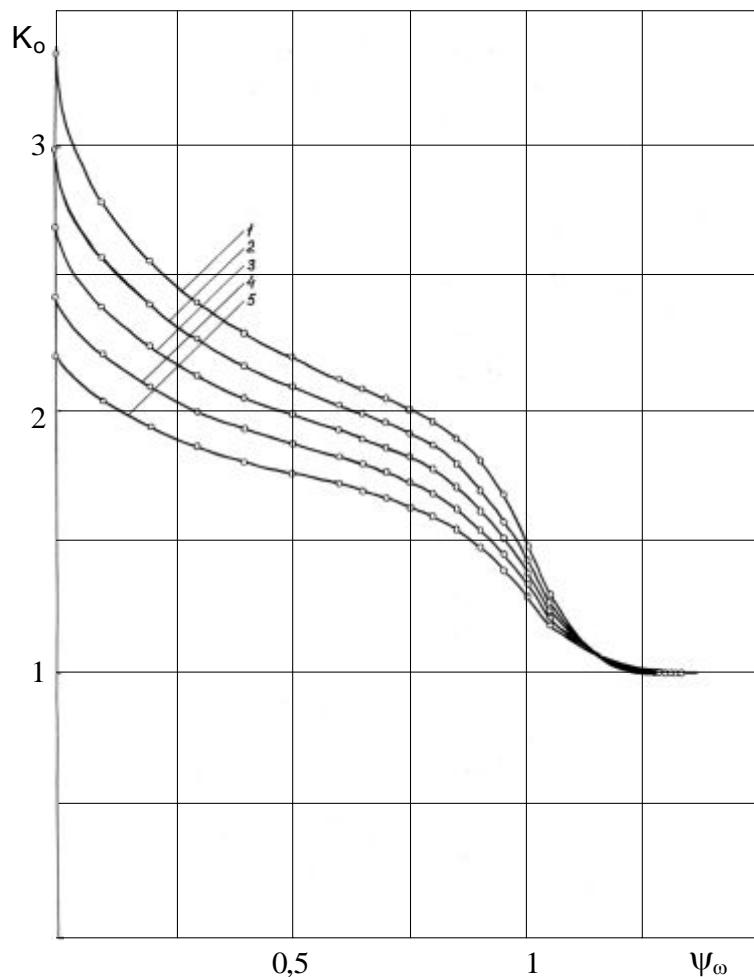


Рис. 3. Залежності  $K_o$  від  $\Psi_\omega$  при  $d/D = 0,01$ :  
1 –  $\kappa = 0,25$ , 2 –  $\kappa = 0,3$ , 3 –  $\kappa = 0,35$ , 4 –  $\kappa = 0,4$ , 5 –  $\kappa = 0,45$ .



Рис. 4. Картини руху завантаження при двостадійному подрібненні:  
а – попередній помел, б – тонкий помел.

**Список літератури:** 1. Дэвис Э.В. Тонкое дробление в шаровых мельницах / Э.В. Дэвис; [пер. с англ.] // Технология и практика измельчения. – М., Л., Новосибирск: ГНТГИ, 1932. – С. 194 – 234. 2. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик / В.А. Олевский. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 448 с. 3. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М.: Недра, 1980. – 415 с. 4. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий / Д.К. Крюков. – М.: Недра, 1966. – 174 с. 5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – М.: Химия, 1977. – 368 с. 6. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – М.: Недра, 1982. – 366 с. 7. Маляров П.В. О движении внешнего слоя шаров при смешанном режиме работы барабанных мельниц / П.В. Маляров, В.Ф. Степурин // Обогащение руд. – 1979. – № 2 (142). – С. 29 – 32. 8. Юдахин Н.Н. Распределение массы загрузки в трубной мельнице при смешанном режиме / Н.Н. Юдахин // Тр. ВНИИЦеммаш. – 1979. – Вып. 22. – С. 61 – 67. 9. Морозов Е.Ф. О механике дробящих тел барабанной мельницы при смешанном скоростном режиме / Е.Ф. Морозов // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1981. – № 6. – С. 73 – 80. 10. Мамієга В. Механіка руху тіл, що мелють, в млинах з активізаційними бронефутераціями / В. Мамієга // Вісн. ТДТУ. – Тернопіль: ТДТУ, 1999. – Т. 4, № 2. – С. 23 – 29. 11. Науменко Ю.В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів: Монографія / Ю.В. Науменко. – Рівне: Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с. 12. 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.

Надійшла до редакції 25.07.11

УДК 666.189.3

**О.В. КАРАСИК**, канд. тех. наук,  
асистент, ДВНЗ «УДХТУ», Дніпропетровськ,  
**Я.В. ЛИСЯК**, студент, ДВНЗ «УДХТУ», Дніпропетровськ

## **ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА КІНЕТИКУ ПОМЕЛУ ТА СТРУКТУРУ ПІНОСКЛА**

Досліджено вплив KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> на кінетику помелу бою листового віконного скла. Для виготовлення піноскла в якості газоутворювача використовували 2 мас. % крейди. Встановлено, що якісною рівномірною структурою володіють матеріали одержані з додаванням K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> та K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> при наступних умовах вспінення: температура – 800 °C, час – 1 год.

Исследовано влияние KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> на кинетику помола боя листового оконного стекла. Для изготовления пеностекла в качестве газосоздателя использовали 2 масс. % мела. Установлено, что качественной равномерной структурой владеют материалы полученные с добавлением K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> при следующих условиях вспенивания: температура – 800 °C, время – 1 час.

Investigated influence KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> on kinetics a grinding of fight of a sheet windowpane. For reception foamglass in quality edu gas 2 mass. %. It is established, that qualitative uniform structure characterized the materials received with addition K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> under following conditions of foaming: temperature – 800 °C, time – 1 hour.

## **Вступ.**

Піноскло є найбільш перспективним теплоізоляційним та звукоізоляційним матеріалом [1, 2]. В залежності від технологічного режиму обробки шихти піноскло може мати замкнуті несполучені, сполучені або частково сполучені пори і, як наслідок, різноманітні властивості [3]. На сучасному етапі проводяться дослідження з вивчення впливу складу базового скла та газоутворювача на властивості піноскла, але її досі існують проблеми одержання його рівномірної якісної структури [4, 5].

## **Організація експериментів.**

В якості базового доцільно використовувати скляний бій, а саме пропонується використовувати бій листового віконного скла (100 мас. %), в якості газоутворювача – крейду (2 мас. %), в якості поверхнево-активних речовин (ПАР) – KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (0,2 мас. %).

Питому поверхню визначали на приладі Товарова, суть якого заснована на вимірюванні опору, який чинить шар ущільненого матеріалу повітря, що просмоктується. Диференційно-термічний аналіз (ДТА) здійснювали на приладі «Деріватограф Q-1500Д». Вспінювання зразків проводили в силітовій печі при температурі 800 °C протягом 1 години. Щільність визначали згідно стандартної методики.

## **Результати експериментів та їх обговорення.**

Відомо, що умови приготування шихти для виготовлення піноскла мають великий вплив на його структуру, яку отримують після випалу. Для отримання рівномірної комірчастої структури скломаса під час виділення газу повинна характеризуватися відносно високою в'язкістю з метою попередження розриву комірок, що утворюються, а також низьким поверхневим натягом для виключення об'єднання мілких пір в більш великі комірки [6].

Залежність питомої поверхні базового скла з додаванням ПАР від часу його помелу наведена на рис. 1. Максимальними значеннями питомої поверхні володіє скло після 2,5 годин помелу без додавання ПАР. При помелі протягом 2 годин для всіх сумішей (крім чистого скла) значення питомої поверхні становить ~ 9000 см<sup>2</sup>/г. Термограми композиційних сумішей після 2 годин помелу представлена на рис. 2.

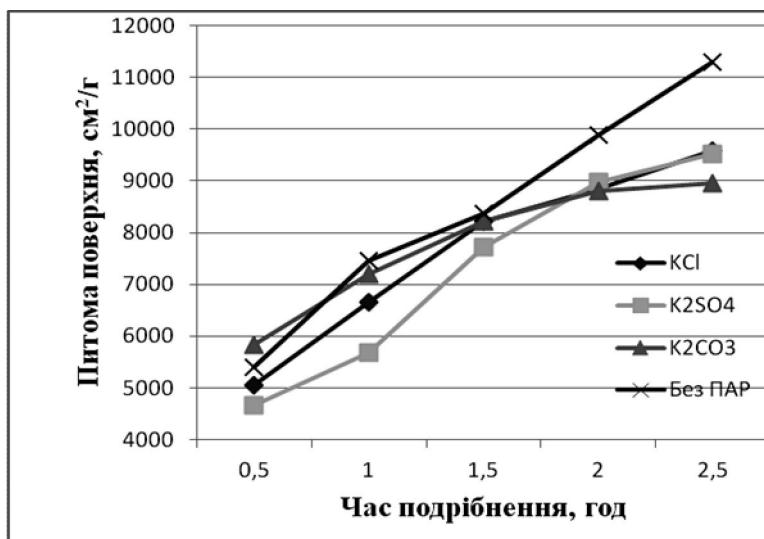


Рис. 1. Залежність питомої поверхні суміші від часу її помелу

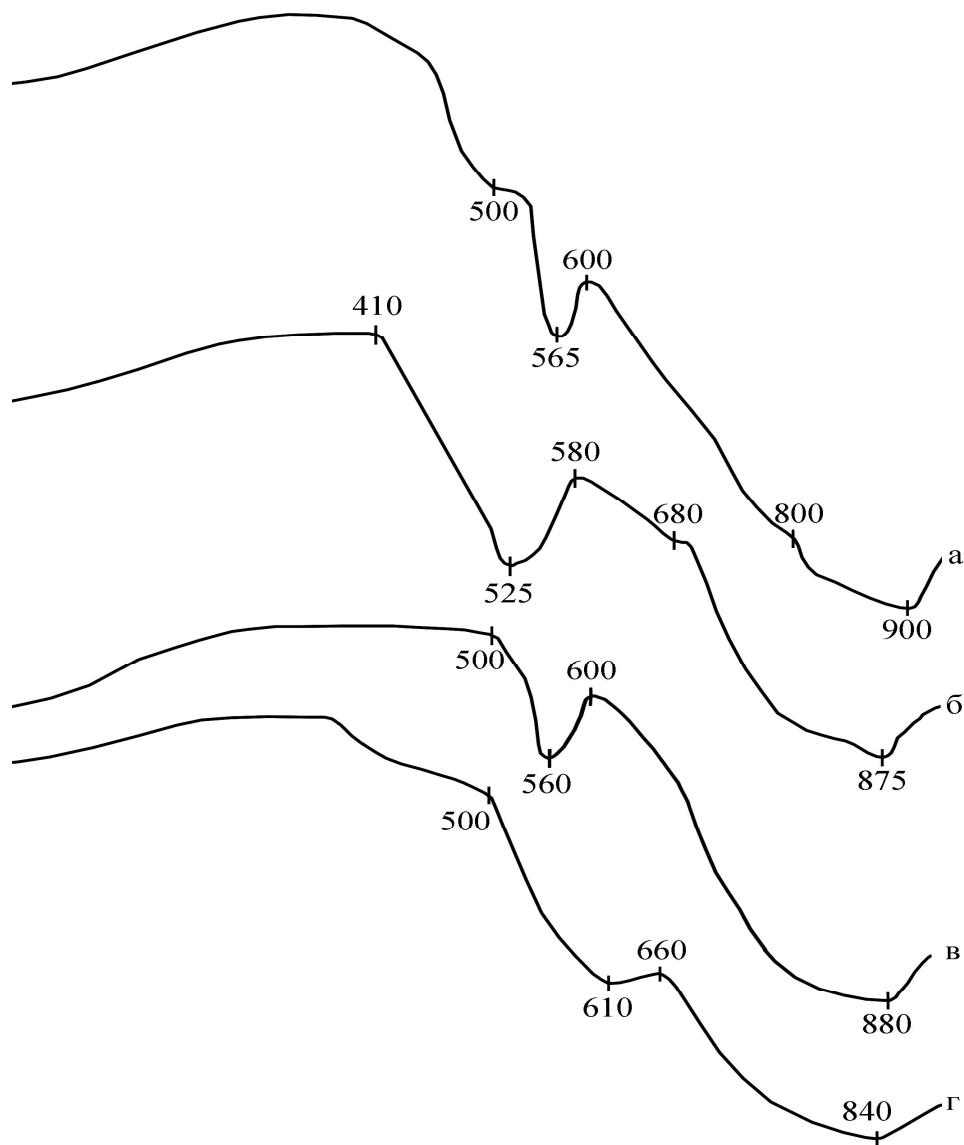


Рис. 2. Термограми композиційних сумішей після 2 годин помелу з додаванням:  
а) KCl; б) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; в) K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; г) чисте скло.

Мінімальна температура виділення газової фази – 840 °С – відповідає композиційної суміші на базі чистого скла.

При додаванні ПАР температура виділення CO<sub>2</sub> зростає до 875 – 900 °С, хоча температура розм’якшення скла – зменшується з 610 °С для чистого скла до 560 – 565 °С для композицій з додаванням KCl та K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, мінімальне значення температури становить 525 °С для композиції з додаванням K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Проаналізувавши отримані та відомі дані, можливо передбачити, що більш рівномірне вспінювання досягається в тому випадку, коли градієнт температур між шарами спеку мінімальний як в період спікання суміші, так і в період структуроутворення піноскла.

Найменше значення коефіцієнту тепlopровідності досягається при ущільненні шихти методом пресування, тому в подальшому процес вспінювання розглядається на відпресованих зразках, щільність яких наведена на рис. 3.

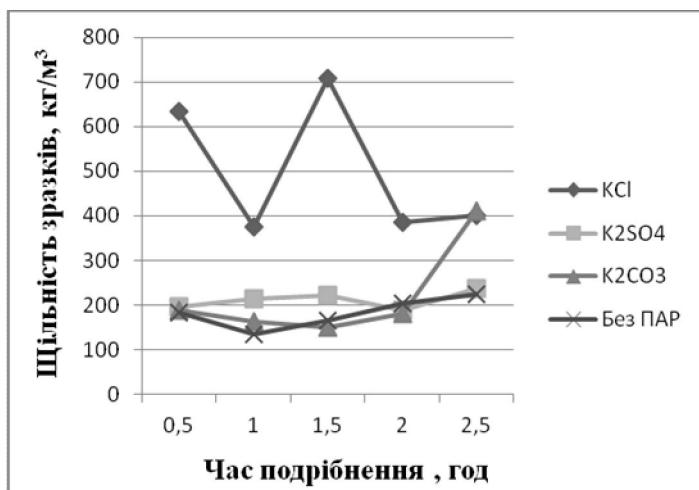


Рис. 3. Вплив часу подрібнення композиційної суміші на щільність піноскла

Щільність найбільш якісних зразків лежить в межах 149 – 236 kg/m<sup>3</sup>, які отримані з додаванням в якості ПАР K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> та K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Поганою якістю з максимальними значеннями щільності характеризуються зразки з додаванням KCl. Піносцило одержане на базі чистого скла без додавання ПАР має нерівномірну структуру з незначною кількістю великих пір.

## Висновки.

На базі бою листового віконного скла отримане якісне піносцило з додаванням 2 мас. % крейди. Встановлено вплив кінетики помелу вихідних композиційних сумішей з ПАР (KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) на структуру та щільність піноска.

Визначено, що за прийнятих умов вспінювання найбільш якісною рівномірною структурою характеризуються зразки з  $K_2SO_4$  та  $K_2CO_3$ , виготовлені на базі композиційних сумішей, час помелу яких складав 2 години. Щільність таких матеріалів знаходиться в межах  $149 - 236 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

**Список літератури:** 1. Сосунов Е. О преимуществах пеностекла в сравнении с другими теплоизоляционными материалами / Е. Сосунов // Стекло мира. – 2005. – №3. – С. 90 – 96. 2. Ильев Ю.Л. Пеностекло / Ю.Л. Ильев, Р.В. Петухова, Н.И. Генеральчик // Стекло мира. – 2004. – № 6. – С. 83 – 86. 3. Шутов А.И. Использование мела и других карбонатных компонентов при производстве звуко- и теплоизоляционных материалов/ А.И. Шутов, В.И. Мосыпан, П.А. Воля // Проблемы производства и использования мела в промышленности и сельском хозяйстве: межд. научн.-практ. конф., 2001 г.: сборн. докл. – Белгород, 2001. – С. 113 – 118. 4. Лотов В.А. Кинетика процесса вспенивания пеностекла / В.А. Лотов, Е.В. Кривенкова // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: всерос. научн. конф., 26 – 28 ноябр. 2002 г.: тезисы докл. – Томск, 2002. – Т. 1. – С. 99 – 101. 5. Россомагина А.С. Химико-технологические основы производства пеностекла из стеклобоя / А.С. Россомагина, И.С. Пузанов, А.А. Кетова. – М.: Компания «Спутник+», 2003. – 63 с. 6. Демидович Б.К. Пеностекло / Б.К. Демидович. – Минск: «Наука и техника», 1975. – 247 с.

Надійшла до редколегії 25.07.11

УДК 666.983

**І.А. ЕМЕЛЬЯНОВА**, док. техн. наук, проф., ХДТУСА, Харків,  
**В.В. БЛАЖКО**, канд. техн. наук, доц. ХДТУСА, Харків,  
**А.И. АНИЩЕНКО**, аспирант, ХДТУСА, Харків,  
**О.В. ДОБРОХОДОВА**, аспирант, ХДТУСА, Харків

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ В СМЕСИТЕЛЯХ, РАБОТАЮЩИХ В КАСКАДНОМ РЕЖИМЕ**

В статті представлені нові конструкції бетонозмішувачів примусової дії. Наведено теоретичні залежності, що пояснюють процес приготування будівельної суміші з використанням каскадного руху часток у корпусі машини.

В статье представлены новые конструкции смесителей принудительного действия. Представлены теоретические зависимости объединяющие процесс приготовления строительной смеси при создании каскадного режима движечения частич в корпусе смесителя.

The paper presents new designs of compulsory mixer. The theoretical dependence of unifying the process of making the building blend to create a cascade mode in the case of partial dvicheniya new mixers.

Основным недостатком смесителей принудительного действия является их низкая усреднительная способность, как на макро, так и на микроуровне, что объясняется незначительным процентом разрушения мелких агломератов из частиц растворной составляющей и отсутствием идентичных условий перемешивания по высоте сечения рабочей зоны.

С целью равномерного распределения компонентов в общем объеме замеса отдельным частицам бетонной смеси необходимо сообщить такие траектории движения, которые обеспечивали бы наибольшую возможность их пересечения.

Для повышения эффективности работы бетоносмесителей с горизонтальными лопастными валами необходимы принципиально новые подходы к созданию этих машин.

На основе многолетних теоретических и экспериментальных исследований, разработаны новые конструкции смесителей принудительного действия (рис. 1 – 3).

Конструктивная особенность новых машин свидетельствует о сложности перемещения частиц строительной смеси в рабочем пространстве машины.

С одной стороны, для машины характерны особенности гравитационных смесителей, а с другой стороны – смесителя принудительного действия.

Сочетание работы двух смесителей в одной машине позволяет получить новый комбинированный способ перемешивания компонентов смеси.

При этом, наблюдается пересечение траекторий движения частиц, которые перемещаются в свободном падении и сбрасываются лопатками горизонтального вала.

Сочетание двух движений способствует созданию каскадного режима процесса перемешивания.

Движение частиц бетонной смеси в каскадном режиме может быть представлено системой уравнений, выраженной через цилиндрическую систему координат ( $r, \theta, z$ ), которая дает возможность учесть угловую скорость вращения рабочего.

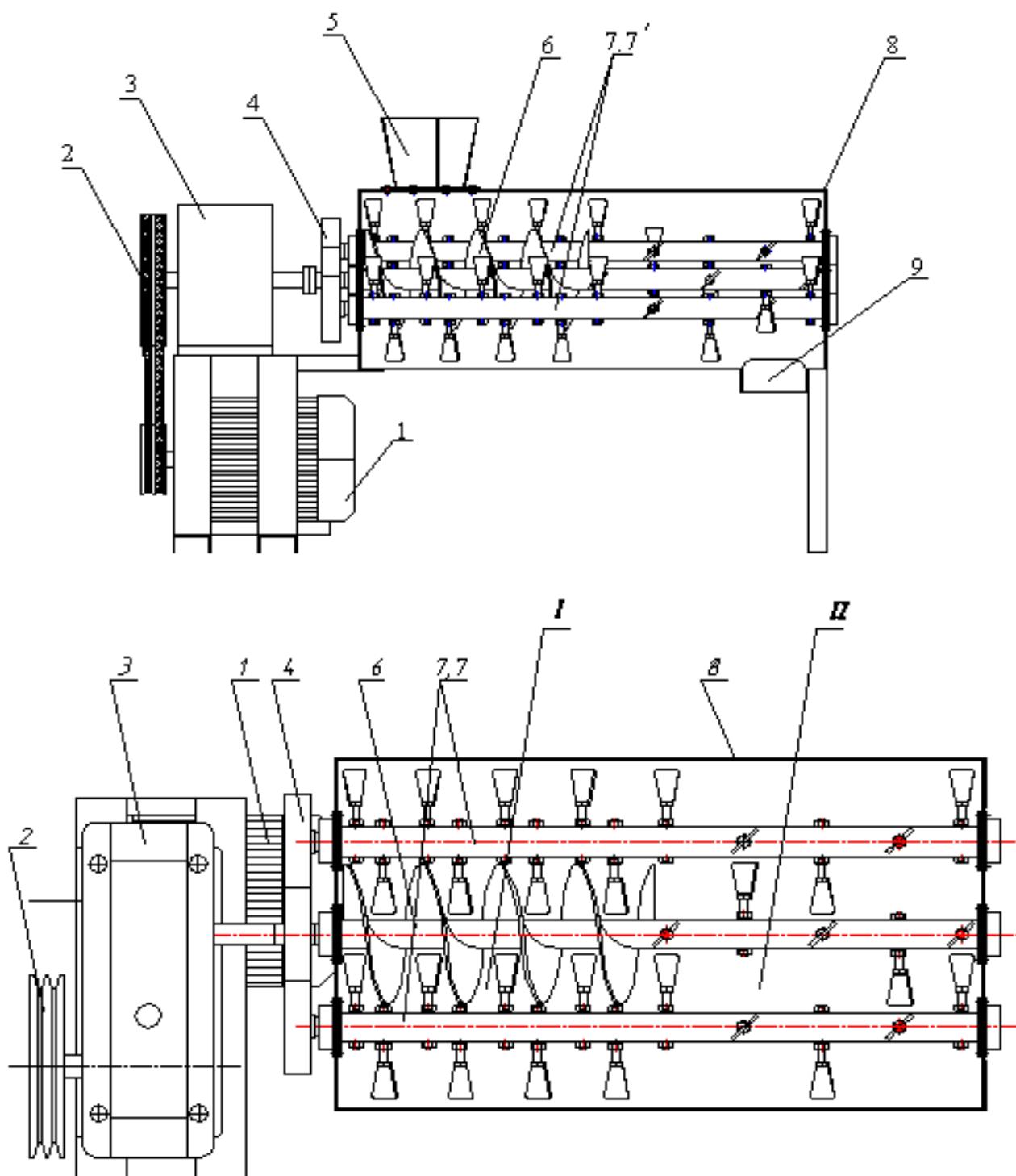


Рис. 1. Конструктивная схема трехвального бетоносмесителя:

- 1 – двигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – редуктор; 4 – открытая зубчатая передача;  
 5 – загрузочный бункер; 6 – шнековый вал; 7, 7' – верхний и нижний лопастные валы;  
 8 – корпус бетоносмесителя; 9 – разгрузочный патрубок;  
 I – зона перемешивания сухих компонентов бетонной смеси;  
 II – зона приготовления бетонной смеси с заданным водоцементным отношением.

В таком случае система уравнений движения примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot \left( \frac{dV_r}{dt} + V_r \cdot \frac{dV_r}{dr} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{dV_r}{d\theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \cdot \frac{dV_z}{dz} \right) = - \frac{dp}{dr} - \\ - \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r \cdot \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\tau_{r\theta}}{d\theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{d\tau_{rz}}{dz} \right) + \rho \cdot g_r + \rho \cdot (r \cdot \omega_i^2 + 2 \cdot \omega_i \cdot V_\theta); \\ \rho \cdot \left( \frac{dV_\theta}{dt} + V_r \cdot \frac{dV_\theta}{dr} + V_\theta \cdot \frac{dV_\theta}{r d\theta} + \frac{V_r \cdot V_\theta}{r} + V_z \cdot \frac{dV_\theta}{dz} \right) = - \frac{1}{r} \cdot \frac{dp}{d\theta} - \\ - \left( \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r^2 \cdot \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\tau_{\theta\theta}}{d\theta} + \frac{d\tau_{r\theta}}{dz} \right) + \rho \cdot g_\theta + (-2 \cdot \rho \cdot \omega_i \cdot V_\theta); \\ \rho \cdot \left( \frac{dV_z}{dt} + V_r \cdot \frac{dV_z}{dr} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{dV_z}{d\theta} + V_z \cdot \frac{dV_z}{dz} \right) = - \frac{dp}{dz} - \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r \cdot \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\tau_{\theta z}}{d\theta} + \frac{d\tau_{zz}}{dz} \right) + \rho \cdot g_z \end{array} \right. \quad (1)$$

где:  $\vec{g} = \vec{g}(r, \theta, z)$  – вектор ускорения свободного падения;  $\tau_{ij} = \tau_{ij}(r, \theta, z)$  – тензор напряжений в смеси.

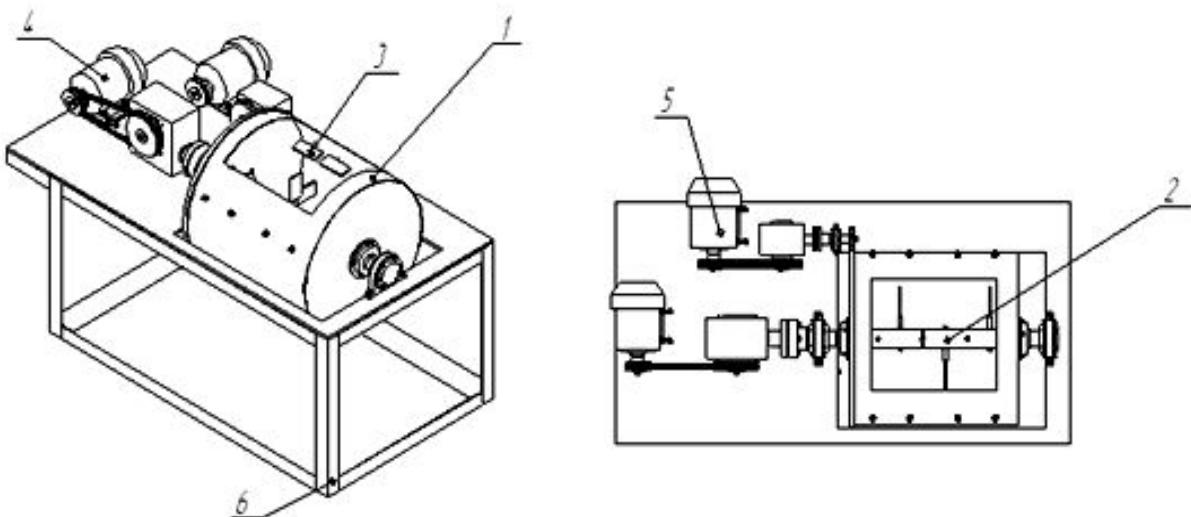


Рис. 2. Схема бетоносмесителя гравитационного – принудительно действия:

1 – барабан; 2 – лопастной вал; 3 – лопасти барабана;

4 – привод лопастного вала; 5 – привод барабана; 6 – рама

Для определения угла схода частицы смеси уравнения (1) могут быть обезразмерены путем введения новых переменных:

$$r' = \frac{r}{R_{cp_i}}; z' = \frac{z}{R_{cp_i}}; V_r' = \frac{V_r}{R_{cp_i}}; V_\theta' = \frac{V_\theta}{V_i}; V_z' = \frac{V_z}{V_i}; \frac{P}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot \omega_i^2 \cdot R_{cp} \cdot h_i;$$

$$F_{r_u} = \frac{V_i^2}{\omega_i^2 \cdot R_{cp}^2}$$

$R_{cp_i}$  – средний радиус потока вблизи  $i$  – того вала;  $F_{r_u}$  – центробежный критерий Фруда;  $V_i$  – средняя скорость потока смеси вдоль образующей  $i$ -того вала;  $h_i$  – толщина потока возле  $i$ -того вала.

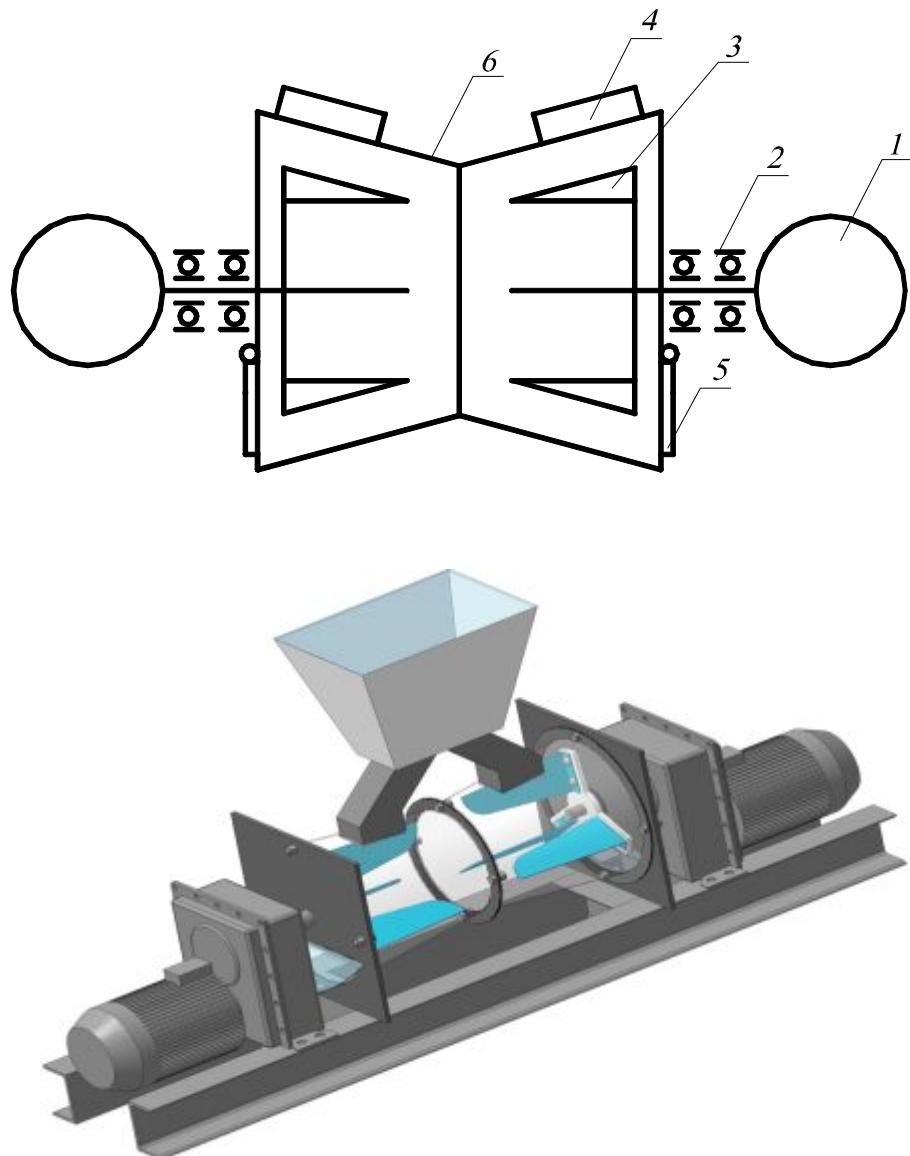


Рис. 3. Кинематическая схема противоточно-турбулентного смесителя  
 1 – мотор-редуктор; 2 – подшипниковые опоры; 3 – ротор;  
 4 – загрузочный патрубок; 5 – заслонка разгрузочного отверстия; 6 – корпус

Образмеривание уравнения (1) позволяет ввести понятие основной системы координат, которую в свою очередь можно связать с одной из торцевых стенок корпуса бетоносмесителя, в которую упираются торцы вала.

Связь между двумя системами координат может быть представлена ниже приведенными уравнениями:

$$\begin{aligned}
r^2 &= R_{ui}^2 + r_i^2 - 2R_{ui} \cdot r_i \cdot \cos \cdot (90^\circ + \theta_i + 90^\circ - \theta_{ui}) = \\
&= R_{ui}^2 + r_i^2 - 2R_{ui} \cdot r_i \cdot \cos \cdot (180^\circ + \theta_i - \theta_{ui}) = \\
&= R_{ui}^2 + r_i^2 - 2R_{ui} \cdot r_i \cdot \cos \cdot (\theta_i - \theta_{ui})
\end{aligned} \tag{2}$$

Решение уравнения (2) дает возможность определить угол начала движения частицы в каскадном движении:

$$\theta_{ui} = \arctg \left( \frac{x_{ui}}{y_{ui}} \right) \tag{3}$$

Расстояние от начала основной системы координат до локальной (цилindricalической системы) определяется:

$$r = \sqrt{R_{ui}^2 + r_i^2 + 2R_{ui} \cdot r_i \cdot \cos(\theta_i - \theta_{yi})} \tag{4}$$

$$r \cdot \cos \theta = R_{ui} \cdot \cos \theta_{ui} + r \cdot \cos \theta_i \tag{5}$$

Тогда значение угла  $\theta$  определяется:

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{R_{ui} \cdot \cos \theta_{ui} + r_i \cdot \cos \theta_i}{r} \right\} \tag{6}$$

Интенсивность процесса перемешивания компонентов в смесителях новой конструкции определяется с учетом качественных свойств материала, подаваемого в смеситель.

Среднее содержание усредняемого компонента в смесителе за период  $t$ :

$$X_{cp} = \frac{1}{t} \int_0^t X(t) dt \tag{7}$$

Качественные свойства смеси в пределах интервала времени  $\Delta t$  (время одного оборота рабочего органа), изменяются довольно плавно. В смежных сечениях общего объема смеси, которая находится в смесителе и периодически выбирается в виде отдельных порций каждой лопatkой рабочего органа.

Коэффициент уменьшения дисперсии показателей качества на выходе

для экспоненциальной корреляционной функции определяется по формуле:

$$\frac{D'_x}{D_x} = \frac{K_x(0)}{n_n} + \frac{2e^{-\alpha h}}{n_n^2(1-e^{-\alpha h})^2} \cdot \left[ n_n(1-e^{-\alpha h}) - (1-e^{-n_c \alpha h}) \right] \quad (8)$$

где:  $D_x$  – начальная дисперсия;  $n_n$  – количество порций смеси, захватываемых лопатками смесителя из объема смеси, находящейся в корпусе смесителя;  $\alpha$  – коэффициент погашения корреляционной функции;  $h$  – временной сдвиг фазы отдельных слоев:  $h = \frac{V}{n_n}$ .

При заданной выходной дисперсии  $D'_x$  и известной  $D_x$  дисперсии на входе вместимость смесителя определяется по формуле:

$$V = \frac{2D_x}{\alpha D'_x} \quad (9)$$

Если смеситель заполняется из  $m$  потоков компонентов смеси, существенно отличающихся по качественным свойствам, каждый отдельный поток  $i$  характеризуется самостоятельной корреляционной функцией и образует  $n_i$  порций, то

$$n = \sum_{i=1}^m n_i \quad (10)$$

Если на входе корреляционная функция имела вид экспоненты, то на выходе она будет иметь следующий вид:

При  $\tau > t$

$$K'_x(\tau) = \frac{D_x}{t^2 \alpha^2} \left( e^{-|t-\tau|\alpha} + e^{-|t+\tau|\alpha} - 2e^{-|\tau|\alpha} \right) \quad (11)$$

при  $\tau < t$

$$K'_x(\tau) = \frac{D_x}{t^2 \alpha^2} \left( 2(t - |\tau|)\alpha + e^{-|t-\tau|\alpha} + e^{-|t+\tau|\alpha} - 2e^{-|\tau|\alpha} \right) \quad (12)$$

где:  $t_0$  – интервал времени между подаваемыми порциями бетонной смеси, который обеспечивает равномерность условий перемешивания по всей длине смесителя.

Снижение дисперсии неоднородности во многом зависит от количества циркуляций (возвратов порций) компонентов бетонной смеси в процессе их перемешивания и транспортирования.

Лопасти рабочего органа  $N_l$  формируя порции компонентов  $n_p$  смеси, транспортируют их в сторону угла атаки лопасти.

Определив значения корреляционной функции на выходе по формуле (7) и задаваясь начальной и конечной дисперсией однородности смеси  $D_x$ ,  $D'_x$ , а также коэффициентом погашения корреляционной функции  $\alpha$  и вместимостью смесителя  $V$  формула (9), необходимое число порций  $n_n$  усреднения в смесителе которое будет достаточным для получения однородной смеси, определяется по формуле (8).

При определении числа порций смеси, система уравнений примет следующий вид:

$$y_1 = \frac{D_x^1}{D_x} \quad (13)$$

$$y_2 = \frac{K_q}{n_n} + \frac{2 \cdot e^{-\alpha \frac{V}{n_n}}}{\left(1 - e^{-\alpha \frac{V}{n_n}}\right)^2 \cdot n_n} \cdot \left[ n_n \cdot \left(1 - e^{-\alpha \frac{V}{n_n}}\right) - \left(1 - e^{-n_n \cdot \alpha \frac{V}{n_n}}\right) \right] \quad (14)$$

Представленная модель дает возможность с достаточно большой точностью определить количество пакетов смеси, перемещаемых лопатками валов в корпусе смесителя, которое достаточно для достижения высокой однородности бетонной смеси малой подвижности. Величина циркуляций потоков бетонной смеси, которая имеет место при каскадном режиме работы смесителя, определяется отношением количества перемещаемых пакетов смеси  $n_n$  к общему количеству лопаток верхнего и нижнего валов  $Z_l$ .

$$N_{up} = \frac{n_n}{Z_l} \quad (15)$$

**Список літератури:** 1. Пат. 74444 України, МПК В28С5/14. Змішувач для приготування будівельної суміші / Емельянова І.А., Баранов А.Н., Блажко В.В., Тугай В.В.; заявник та патентовласник ХДТУСА. – опубл. 15.12.05, Бюл. 12. 2. Емельянова І.А. Особенности рабочего процесса принудительно-гравитационного бетоносмесителя / И.А. Емельянова, В.В. Блажко, А.И. Анищенко // Науковий вісник будівництва. – 2009. – Вип. 54. – С. 317 – 325.

*Поступила в редколегію 25.07.11*

УДК 666.9

**А.А. ПЛУГИН**, докт. техн. наук, проф., УГАЖТ, Харьков,  
**М.Г. САЛИЯ**, аспирант, ХГТУСА, Харьков,  
**Т.А. КОСТЮК**, канд. техн. наук, доц., ХГТУСА, Харьков

## **ИЗОТРОПНОЕ МИКРОАРМИРОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРОДУКТАМИ ГИДРАТАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ**

Досліджено вплив комплексної органомінеральної добавки, що включає тонкодисперсний кальцит і скловолокно, на властивості цементного каменю гідроізоляційних сухих сумішей.

Исследовано влияние комплексной органоминеральной добавки, включающей тонкодисперсный кальцит и стекловолокно, на свойства цементного камня гидроизоляционных сухих смесей.

The influence of complex organomineral supplements, including fine-grained calcite and glass on the properties of cement waterproofing dry mixes.

В настоящее время для гидроизоляции широко применяются сухие смеси на основе портландцемента. Несмотря на применение водоредуцирующих добавок, их недостатком является склонность к усадке при твердении, приводящей к образованию микротрещин и снижению водонепроницаемости. Одним из традиционных путей снижения усадки таких составов является введение глиноземистого клинкера, гипса или других компонентов, обеспечивающих расширение цементного камня [1, 2]. Однако этим процессом трудно управлять, а цементный камень впоследствии может подвергнуться деструкции вследствие перекристаллизации гидросульфоалюминатов и т.п.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование повы-

шения водонепроницаемости цементного камня без введения глиноземистого клинкера и т.п.

Выполнен анализ литературных данных по исследуемой проблеме. Установлено, что широкие возможности для управления физико-механическими и гидрофизическими свойствами цементного камня открывает применение минеральных добавок, основывающееся на анализе его структуры как «микробетона Юнга» [1, 3].

В [4] установлено, что цементный камень портландцемента с добавками карбонатных пород по показателям прочности, коррозионной стойкости, морозостойкости не уступает бездобавочному портландцементу. Отмечается также, что вместо  $C_3AH_6$  образуются  $C_4AH_x$  и гидрокарбоалюминат кальция  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$  – гексагональные пластинчатые кристаллы, образующие прочно сросшиеся агрегаты в виде плотных войлочных скоплений с отчетливой щетинообразной зоной на поверхности карбонатных частиц. Однако в [4] лишь констатируются соединения и их морфология, природа же контактов и взаимодействий между элементами структуры не анализируется.

Физико-механические свойства материалов на основе портландцемента, особенно прочности на изгиб и растяжение, износстойкости повышают также введением волокнистых компонентов – асбеста, стекловолокна, стальной или полипропиленовой фибры [1; 2 и др.].

В [5, 6] показано, что важная роль в формировании свойств цементного камня принадлежит электроповерхностным свойствам его составляющих и взаимодействиям между ними. Так, в [7] установлено, что в смеси из перлитового песка, портландцемента и комплексной добавки в порах перлита, обладающего отрицательным поверхностным зарядом, образуются кристаллы гидроалюминатов кальция с положительным поверхностным зарядом. В [8] на основе учета электроповерхностных взаимодействий было достигнуто повышение прочности и снижение усадки цементного камня за счет введения комплексной добавки, включающей дисперсный кальцит.

Выдвинута гипотеза о повышении физико-механических свойств, в т.ч. водонепроницаемости цементного камня за счет введения комплексной добавки, включающей дисперсный кальцит, стекловолокно и ускорители твердения – хлорид и нитрат кальция  $CaCl_2$  и  $Ca(NO_3)_2$ . Стекловолокно, являясь подложкой для образования продуктов гидратации, обеспечит своеобразное изотропное микроармирование цементного камня их пространственной структурой, насыщенной электрогетерогенными контактами (рис. 1), что

обеспечит повышение прочности на растяжение и предотвращение усадки даже при растворении стекловолокна в щелочной среде цементного камня.

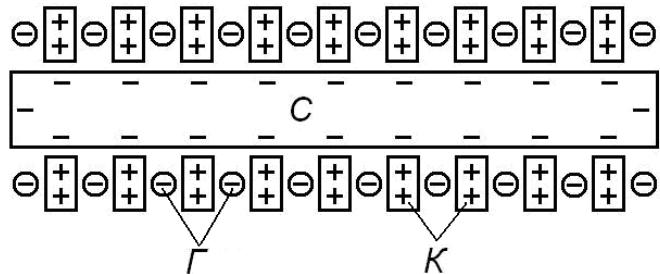


Рис. 1. Предполагаемая структура продуктов гидратации цемента вокруг стекловолокна:

С – стекловолокно; К – кристаллогидраты портландита, гидроалюминатов и гидросульфоалюминатов кальция; Г – частицы гидросиликатного геля

Результаты исследований. Поверхностный заряд стекловолокна определен исходя из его среднего стехиометрического состава  $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2$  [1] и электроповерхностных потенциалов оксидов [5] по методике [5]:

- абсолютный электроповерхностный потенциал:

$$\psi_{\vartheta n}^0 = (2,207 + 1,37 + 6 \times 0,56)/8 = +0,217 \text{ В};$$

- равновесный электроповерхностный потенциал при  $\text{pH} = 12$  (порового электролита цементного камня):

$$\psi_{\vartheta n}^p = \psi_{\vartheta n}^0 - 0,059\text{pH} = 0,217 - 0,059 \times 12 = -0,499 \text{ В},$$

где 2,207; 1,37; 0,56 – абсолютные электроповерхностные потенциалы  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{SiO}_2$ , соответственно.

Таким образом, в среде цементного камня стекловолокно обладает отрицательным поверхностным потенциалом  $\psi_{\vartheta n}^p = -0,499 \text{ В}$  зарядом и может быть подложкой для кристаллизации продуктов гидратации с положительным поверхностным зарядом, что соответствует схеме на рис. 1.

Проведены электронно-микроскопические исследования сколов цементного камня добавкой стекловолокна и комплексной добавкой дисперсного кальцита, стекловолокна,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{CaCl}_2$  с помощью сканирующего электронного микроскопа. Результаты исследований представлены на рис. 2 ÷ 4.

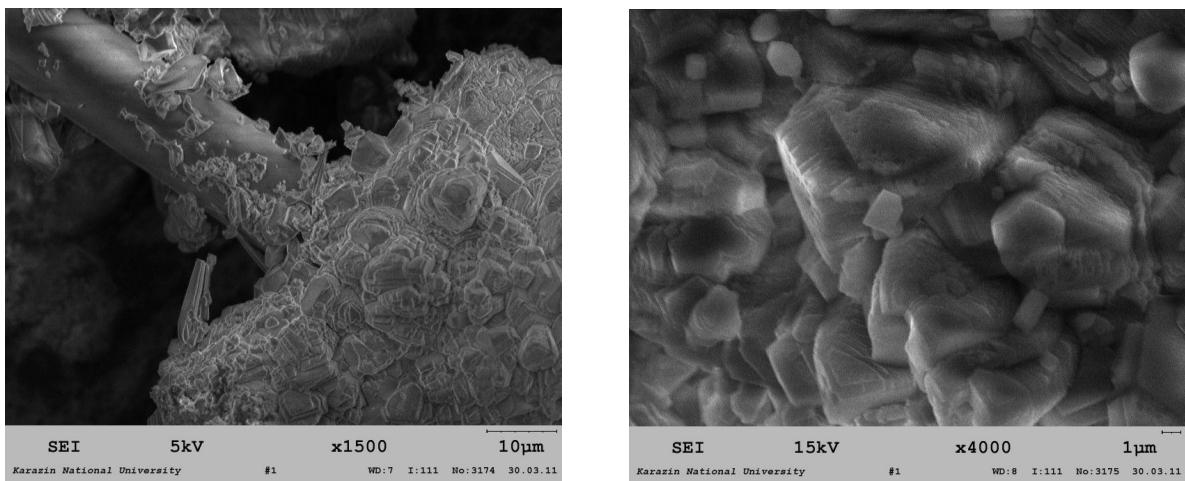


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки сколов цементного камня с добавкой стекловолокна на 28 сутки твердения

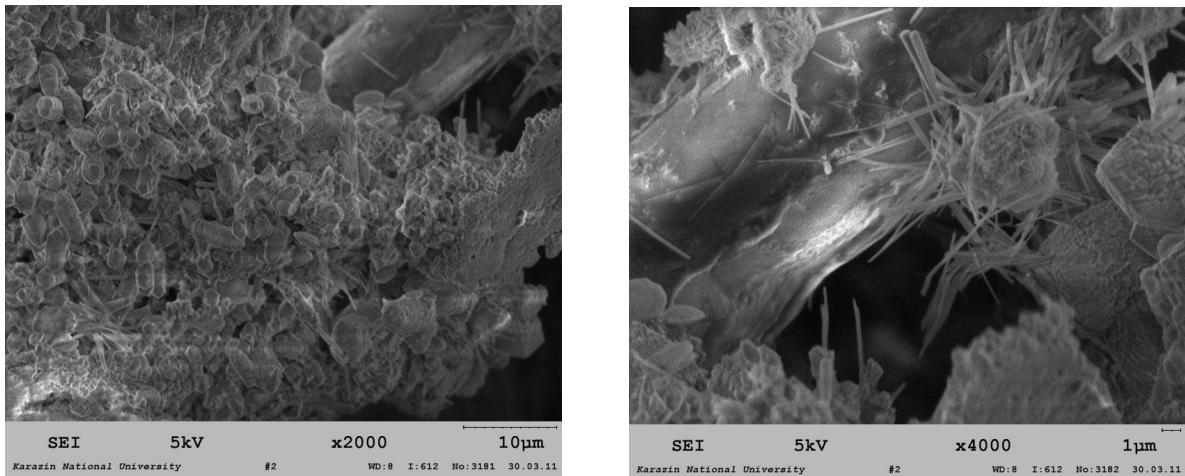


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки сколов цементного камня с комплексной добавкой дисперсного кальцита, стекловолокна,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{CaCl}_2$  на 7 сутки твердения.

На рис. 2 приведены электронно-микроскопические снимки (ЭМС) цементного камня с добавкой только стекловолокна на 28 сутки твердения. Из рис. 2 видно, что стекловолокно (диаметр волокон до 10 мкм) обросло продуктами гидратации – преимущественно гексагональными пластинчатыми кристаллами размером до 5 мкм, характерными для портландита.

На рис. 3 представлены ЭМС цементного камня с комплексной добавкой дисперсного кальцита, стекловолокна,  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  на 7 сутки твердения. Из рис. 3 видно, что стекловолокно обросло продуктами гидратации, в составе которых имеются иглообразные кристаллы длиной до 5 мкм, характерные для этtringита, гидрокарбоалюминатов, гидрохлоралюминатов кальция, а на поверхности стекловолокна наблюдаются следы эрозии.

На рис. 4 приведены ЭМС того же цементного камня на 14 сутки твердения. Из рис. 4 видно, что стекловолокно обросло продуктами гидратации – гексагональными (характерными для портландита, гидромоносульфоалюмината кальция) и кубическими (характерными для гидроалюмината кальция) кристаллами размером до 2 мкм.

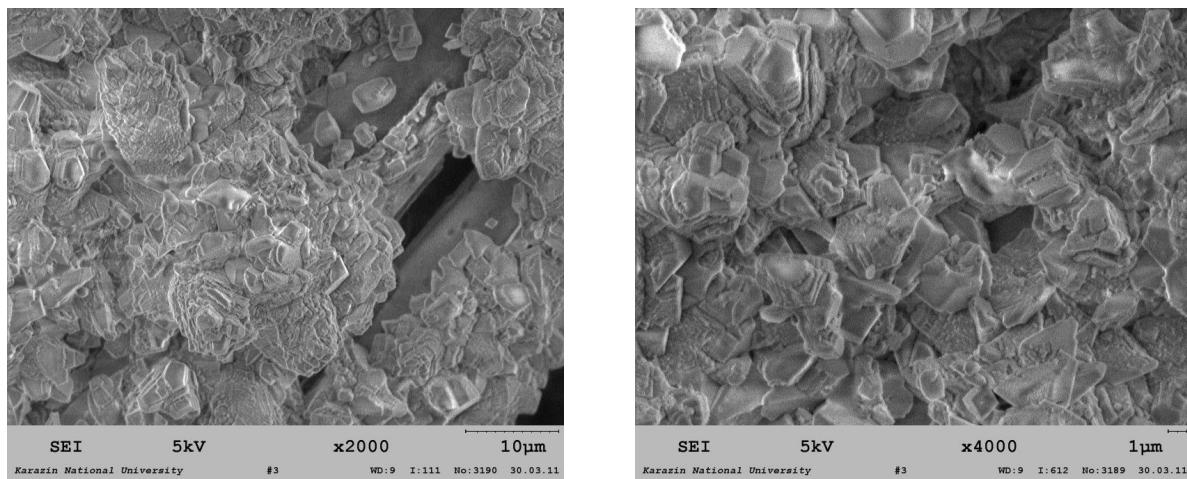


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки сколов цементного камня с комплексной добавкой дисперсного кальцита, стекловолокна,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{CaCl}_2$  на 14 сутки твердения.

На рис. 5 представлены ЭМС того же цементного камня на 28 сутки твердения.

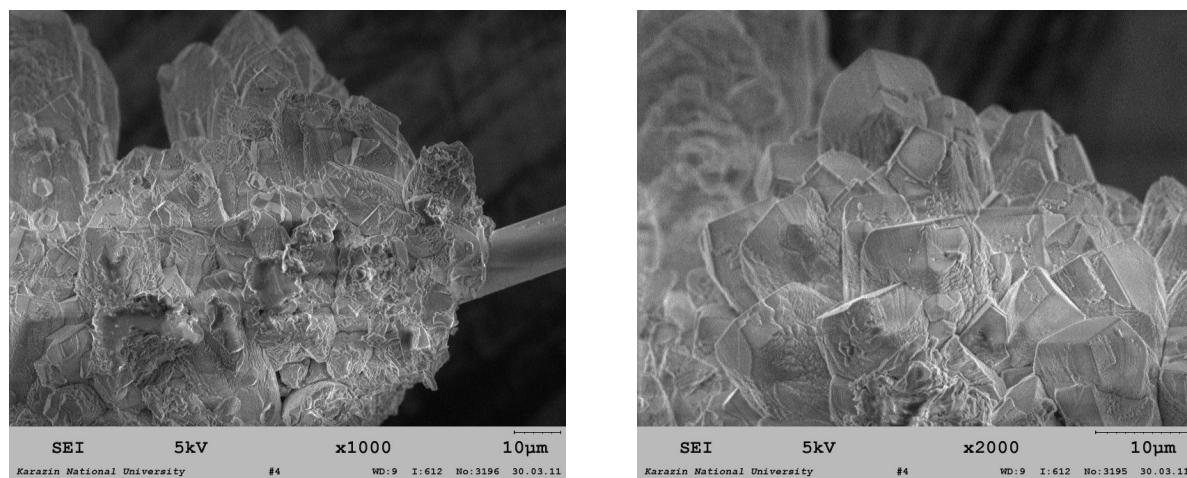


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки сколов цементного камня с комплексной добавкой дисперсного кальцита, стекловолокна,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{CaCl}_2$  на 28 сутки твердения

Из рис. 5 видно, что стекловолокно обросло продуктами гидратации, среди которых наблюдаются преимущественно гексагональные (характерны

для портландита, гидромоносульфоалюмината кальция) и кубические (гидроалюмината кальция) кристаллы размером до 10 мкм.

На большинстве приведенных снимков между кристаллами просматриваются мелкие частицы и агрегаты гидросиликатного геля, обладающего отрицательным поверхностным зарядом.

Таким образом, электронно-микроскопические снимки соответствуют схеме рис. 1.

Были исследованы зависимости прочности на сжатие и изгиб, марки по водонепроницаемости мелкозернистого бетона с комплексной добавкой дисперсного кальцита, стекловолокна,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{CaCl}_2$  от содержания кальцита и стекловолокна. Результаты исследования представлены на рис. 6.

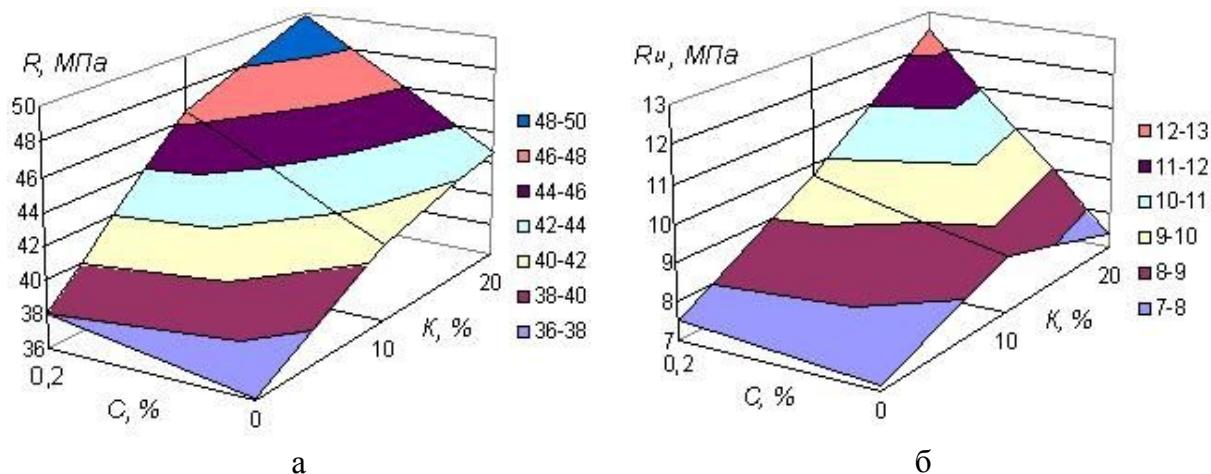


Рис. 6. Зависимость прочности на сжатие  $R$  (а) и изгиба  $R_u$  (б)  
мелкозернистого бетона от содержания дисперсного кальцита  $K$ , %  
от массы цемента и стекловолокна  $C$ , % от массы цемента.

### **Выводы:**

- Установлено, что в среде цементного камня стекловолокно обладает отрицательным поверхностным зарядом и является подложкой для кристаллизации продуктов гидратации с положительным поверхностным зарядом – портландита, гидроалюминатов, гидросульфоалюминатов кальция, а при введении добавок кальцита и хлоридов – гидрокарбоалюминатов, гидрохлоралюминатов кальция. Это обеспечивает своеобразное изотропное микроармирование цементного камня плотной пространственной структурой, насыщенной электрогетерогенными контактами между кристаллогидратами и частицами гидросиликатного геля даже при растворении стекловолокна в щелочной среде цементного камня.

2. Установлено, что совместное введение кальцита и стекловолокна обеспечивает увеличение прочности мелкозернистого бетона на сжатие на 38 %, прочности при изгибе – на 76 %, марки по водонепроницаемости – до W10.

Список литературы: **1.** Горчаков Г.И. Строительные материалы / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с. **2.** Кривенко П.В. Строительное материаловедение / [П.В. Кривенко, Е.К. Пушкирева, В.Б. Барановский и др.]. – К.: Основа, 2007. – 704 с. **3.** Юнг В.Н. Основы технологии вяжущих веществ / В.Н. Юнг. – М.: Промстройиздат, 1951. – 355 с. **4.** Тимашев В.В. Свойства цементов с карбонатными добавками / В.В. Тимашев, В.М. Колбасов // Цемент. – 1981. – № 10. – С. 10 – 12. **5.** Плугин А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих: дисс. ... доктора хим. наук: 02.00.01 / А.Н. Плугин. – К., 1989. – 282 с. **6.** Плугін А.А. Управління міцністю дрібнозернистого бетону одразу після формування на основі урахування електро-поверхневих властивостей його складових / А.А. Плугін, Т.О. Костюк, В.І. Бабушкін // Науковий вісник будівництва. – 1999. – Вип. 7. – С. 63 – 67. **7.** Бондаренко Д.А. Суха будівельна суміш для отримання теплоізоляційних матеріалів зниженої паро проникності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.05. / Д.А. Бондаренко. – Х., 2010. – 20 с. **8.** Плугин А.А. Применение карбонатных добавок в цементных составах для гидроизоляционных и реставрационных работ зданий и сооружений / [А.А. Плугин, Т.А. Костюк, М.Г. Салия и др.] // Сб. научн. тр. Института строительства и архитектуры. – М.: МГСУ, 2011. – Разд. 7. – С. 224 – 227.

Поступила в редакцию 25.07.11

**В.Ф. ГАНКЕВИЧ**, канд. техн. наук, доц.,

ГВУЗ «НГУ», г. Днепропетровск,

**Р.Н. БЖЕЗИЦКИЙ**, студент, ГВУЗ «НГУ», г. Днепропетровск

## **РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Розроблено лабораторну дробарку, що дозволяє подрібнювати матеріали будь-якої міцності.

Разработана лабораторная дробилка, позволяющая измельчать материалы любой крепости.

A laboratory crusher is developed, allowing to grind down materials of any fortress.

Экономический и технологический потенциалы Украины определяются уровнем развития промышленности, основой которой является минерально-сыревая база. Для ускорения процессов исследования и выбора оптимальных решений измельчения горных пород и полимерных материалов любой крепости используют лабораторную базу.

В лабораторных условиях дробят и измельчают материал, проводят экспериментальные исследования, что позволяет ускорить процесс внедрения в производственных условиях результаты разработок.

В горнорудной промышленности измельчение материалов осуществляется барабанными мельницами, где в качестве мелющих тел используются шары, стержни, значительно реже применяют вибрационные или струйные мельницы.

Предварительно был проведен анализ применяемых лабораторных измельчительных установок и патенты на интересующую нас тему.

Наиболее близкими к предъявляемым требованиям относится мельница для пищевых продуктов (патент США № 3827641, 4026490, кл. A 47J42/04, опублик. 1979 г. В.К. Юров, А.Б. Моисеев, Д.В. Артемчук и С.А. Великохатский). Изобретение относится к бытовой технике, а именно к мельницам для пищевых продуктов. Конструктивная схема показана на рис. 1. Целью изобретения является повышение удобства пользования.

Изобретение (рис. 2) относится к бытовой технике, а именно к мельницам для помола пищевых продуктов. Изобретение направлено на снижение и

выравнивание усилий, требуемых для помола, и обеспечения тем самым удобства эксплуатации.

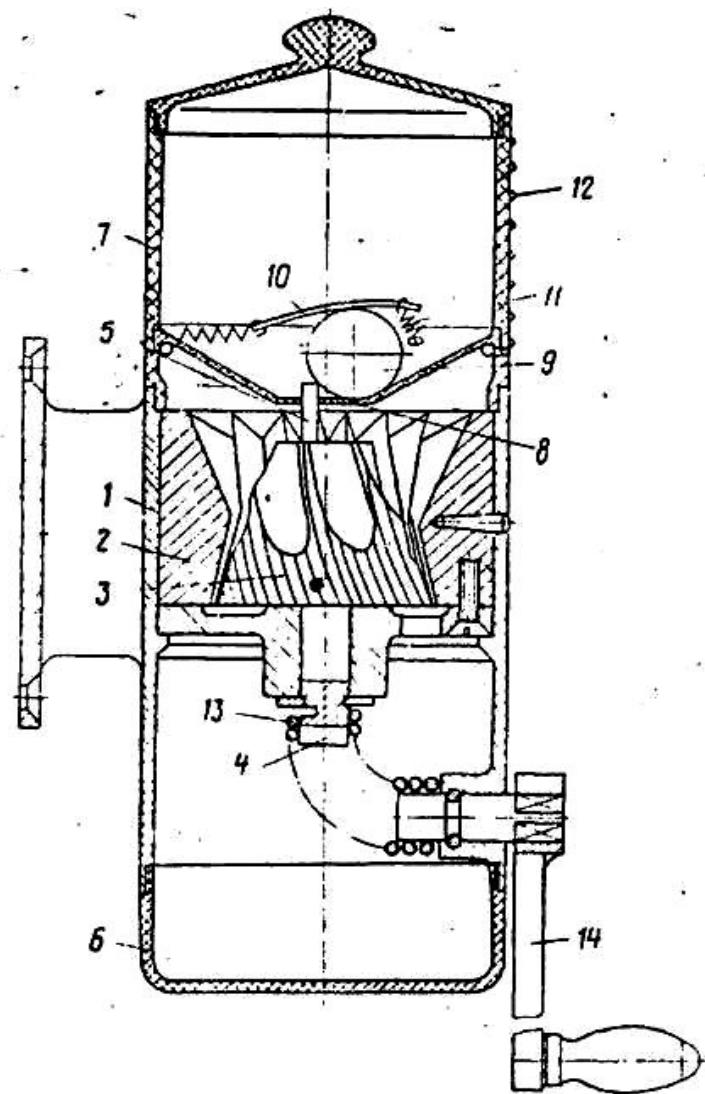


Рис. 1. Патент США № 3827641:

1 – корпус; 2 – мелющее приспособление; 3 – ротор; 4 – хвостовик;  
5 – ворошитель; 6 – лоток; 7 – съемная камера; 8 – зазор; 9 – шарик;  
10 – диск; 11 – пружина; 12 – шкала; 13 – гибкий вал; 14 – рукоятка.

Мельница (рис. 3) – Патент США № 2763440, кл. 241-245, опублик. 1956 В. К. Юров, А. Б. Моисеев. Изобретение относится к бытовой технике, в частности к устройствам для измельчения пищевых продуктов. Целью изобретения является повышение удобства пользования путем облегчения зазора между жерновами. Рассмотренные выше мельницы малопродуктивны, не обеспечивают получение гарантированной фракции измельчения, их конструкции довольно громоздки.

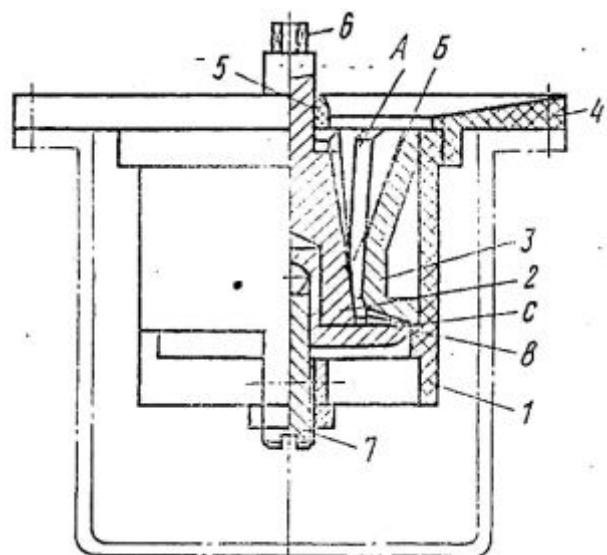


Рис. 2. Патент США № 4212430:

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – приемник; 5 – подшипник;  
6 – вал; 7 – подшипник; 8 – крупные зубья; 9 – мелкие зубья.

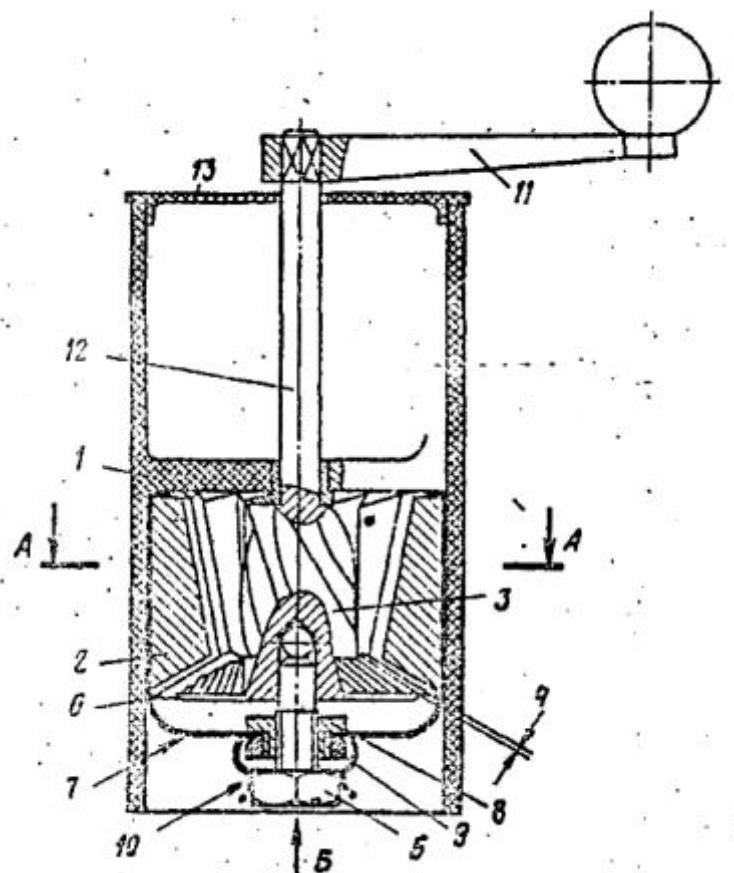


Рис. 3. Патент США № 2763440:

1 – корпус; 2 – неподвижный жернов; 3 – подвижный жернов; 4 – зазор; 5 – винт;  
6 – скоба; 7 – перемычка; 8 – втулка; 9 – гайка; 10 – пружина; 11 – рукоятка;  
12 – вал; 13 – крышка; 14 – винт.

Предлагаемая нами конструкция представлена на рис. 4. Принцип работы: материал загружается порционно через загрузочное отверстие. Проходя в щель между зубьями неподвижного статора и вращающимся ротором поэтапно (в соответствии с параметрами зубьев каждой ступени) происходит его измельчение с дальнейшим его ссыпанием в приемную кольцевую полость, где посредством ворошителя измельченный материал попадает наружу в лоток. Вал приводится в движение при помощи электродвигателя. Соединение вала с насаженными на него деталями осуществляется при помощи шлицев.

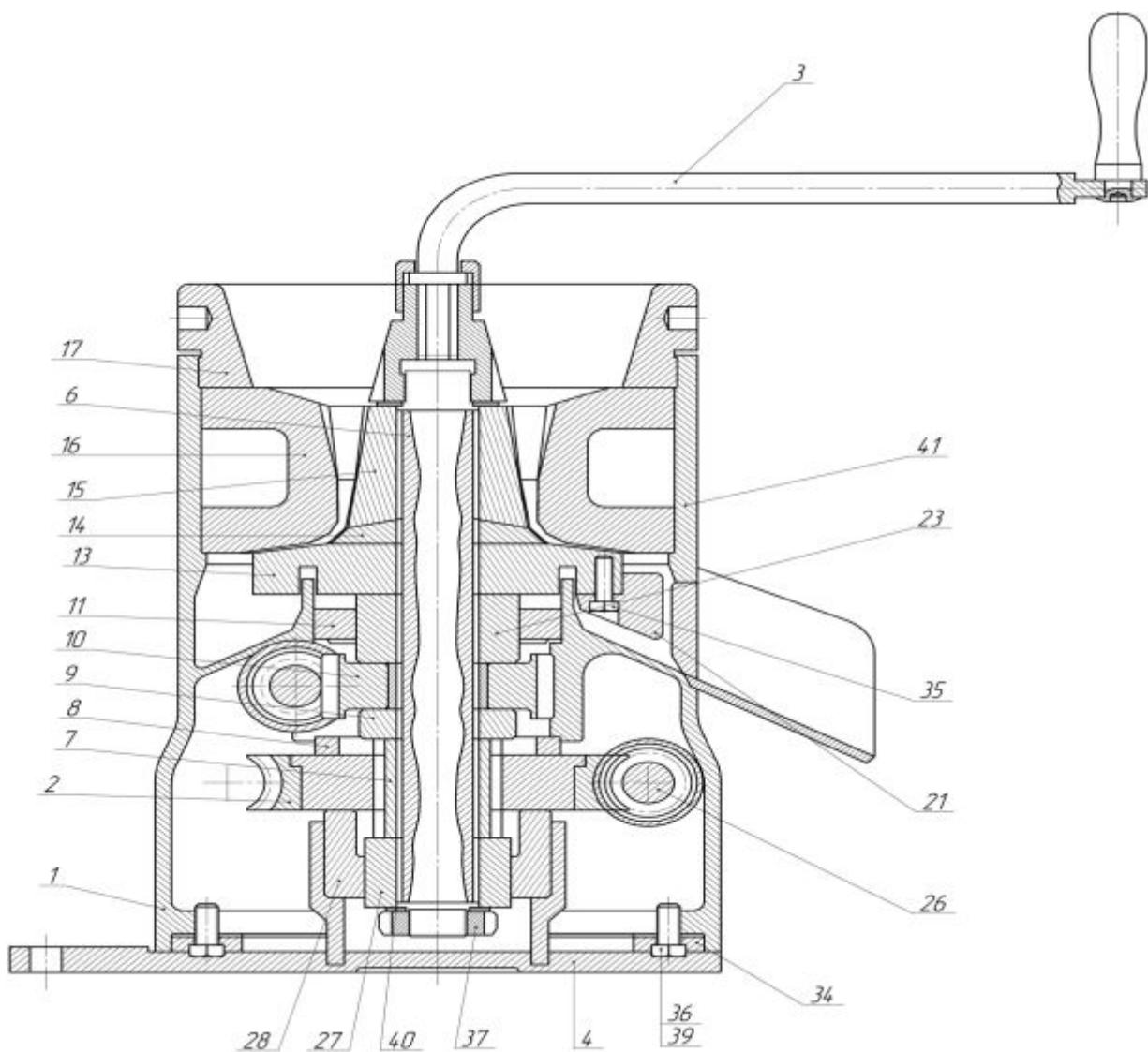


Рис. 4. Конструкция лабораторной дробилки НГУ:

1 – корпус; 2 – червячное колесо; 3 – рукоятка; 4 – фланец нижний; 6 – вал;  
13,14,15 – нижний, промежуточный и верхний роторы; 16 – статор; 22,26 – червяки

Направление движения ротора принимается в соответствии с технологическими нуждами. Вращение вала осуществляется с помощью электродвига-

теля, который соединен с червяком с помощью муфты. Червяк передает вращение на червячное колесо и затем на вал. Регулирование крупности материала на выходе происходит за счет изменения величины зазора между ротором и статором. Изменение зазора достигается путем вертикального перемещения вала, посредством второй червячной пары вручную.

Червяное колесо поз. 2 связано с переходником поз. 7 посредством резьбы, который в свою очередь связан с валом поз. 6 шлицами. Поэтому при вращении червячного колеса поз. 2 червяком поз. 26 происходит осевое перемещение пакета набранных на шлицевом валу деталей, в том числе и ротора с зубьями изменяя технологические зазоры между последними.

Что касается применяемых материалов, для изготовления наиболее ответственных узлов применялись: для червяка – сталь 12ХН3А с цементацией, для венца червячного колеса – фосфористо-оловянная бронза БрАЖ9-41, для статора и ротора, между зубчатыми поверхностями которых происходит измельчение материала, – быстрорежущая сталь Р18, корпус выполнен в виде сварной конструкции из стали 20.

Конструкция имеет небольшие габаритные размеры и вес. Измельчитель предназначен для дробления хрупких, сыпучих материалов с крепостью до 12 единиц по шкале М.М. Протодьяконова. Размер материала после измельчения 0 – 5 мм.

Измельчитель применяется при переработке отходов строительных материалов, ферросплавов, минералов, керамики, стекла, шлаков, отработанных формовочных смесей, угля и многих других материалов. В лабораториях измельчитель применяется в процессе пробоподготовки для измельчения проб.

Предлагаемая конструкция в сравнении с рассмотренными прототипами имеет ряд преимуществ: высокое качество изделия и надежность, более длительный срок службы дробилки, эффективность работы обеспечивается: высокой степенью дробления; одновременной деформацией сжатия и сдвига в частицах материала, возможность установки дробилки на любую ровную, жесткую поверхность, благодаря практически полному отсутствию воздействия вибрационных нагрузок на основание, возможность регулировки гранулометрического состава за счет изменения зазора между мелющим ротором и статором, универсальность – измельчитель имеет возможность проводить дробление в "сухом" и "мокром" режимах, низкий уровень шума, имеет высокую степень защиты от повреждений и коррозии, компактность конструкции за счет применения червячных передач.

**Н.И. СОКУР**, докт. техн. наук, проф., КНУ, Кременчуг,  
**Л.М. СОКУР**, ст. преподаватель, КНУ, Кременчуг,  
**И.Н. СОКУР**, научный сотрудник, КНУ, Кременчуг

## ЦЕНТРОБЕЖНАЯ ДРОБИЛКА С ДЕМПФИРУЮЩЕЙ МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКОЙ РОТОРА

Складною науково-технічною проблемою при створенні дезінтеграторів відцентрового типу є проблема компенсації вібрацій і дисбалансів швидкообертового розгінного ротора. Запропоновано принципово новий спосіб компенсації дисбалансів ротора – магнітна підвіска, сутність якої полягає у створенні магнітної подушки між опорою ротора і корпусом дробарки. Наведено конструкцію відцентрової дробарки з магнітною підвіскою ротора і результат її випробувань, які підтвердили ефективність запропонованого науково-технічного рішення.

Сложной научно-технической проблемой при создании дезинтеграторов центробежного типа есть проблема компенсации вибраций и дисбалансов быстровращающегося разгонного ротора. Предложен принципиально новый способ компенсации дисбалансов ротора – магнитная подвеска, сущность которой заключается в создании магнитной подушки между опорой ротора и корпусом дробилки. Приведена конструкция центробежной дробилки с магнитной подвеской ротора и результаты ее испытаний, которые подтвердили эффективность предложенного научно-технического решения.

The complex scientific and technical problem during development of disintegrators of centrifugal type is a problem of compensations of vibrations and imbalances of fast-revolving accelerating rotor. The principal new method of compensation of rotor imbalances – magnetic suspension has been suggested; the essence of which is in magnetic levitation development between rotary table and breaking machine body. The construction of centrifugal breaking machine with magnetic suspension of rotor and results of its probation have been given that proved the effectiveness of the suggested scientific and technical solution.

**Введение.** Большинство добываемых твердых минеральных ресурсов при переработке подвергаются процессам дезинтеграции – дробления и измельчения. Для этих целей все большее применение в мировой практике находят дробилки центробежно-ударного типа, в которых разрушение твердых материалов происходит способом свободного удара в поле центробежных сил. Рабочим органом этих аппаратов является быстровращающийся разгонный ротор. Но в процессе работы дробилок центробежно-ударного типа возникают технологические и конструктивные дисбалансы быстровращающегося разгонного ротора, которые возникают в результате ассиметричной подачи дробимого материала и износа разгонного ротора.

**Цель работы.** Теоретически обосновать, разработать и исследовать систему подвески разгонного ротора центробежной дробилки с использованием магнитных полей (магнитная подушка); разработать конструкцию центробежно-ударной дробилки с магнитной подвеской разгонного ротора и провести экспериментальные исследования этой конструкции с целью определения ее работоспособности и технических параметров.

**Результаты исследований.** На основании теоретических расчетов магнитных систем «магнит – магнит», «электромагнит – магнит» и П-образной магнитной системы с квадратичными полюсами, а также якорь и электромагнит разработана экспериментальная модель центробежной дробилки с магнитной подвеской ротора. Схема центробежной дробилки с магнитной подвеской ротора приведена на рис. 1.

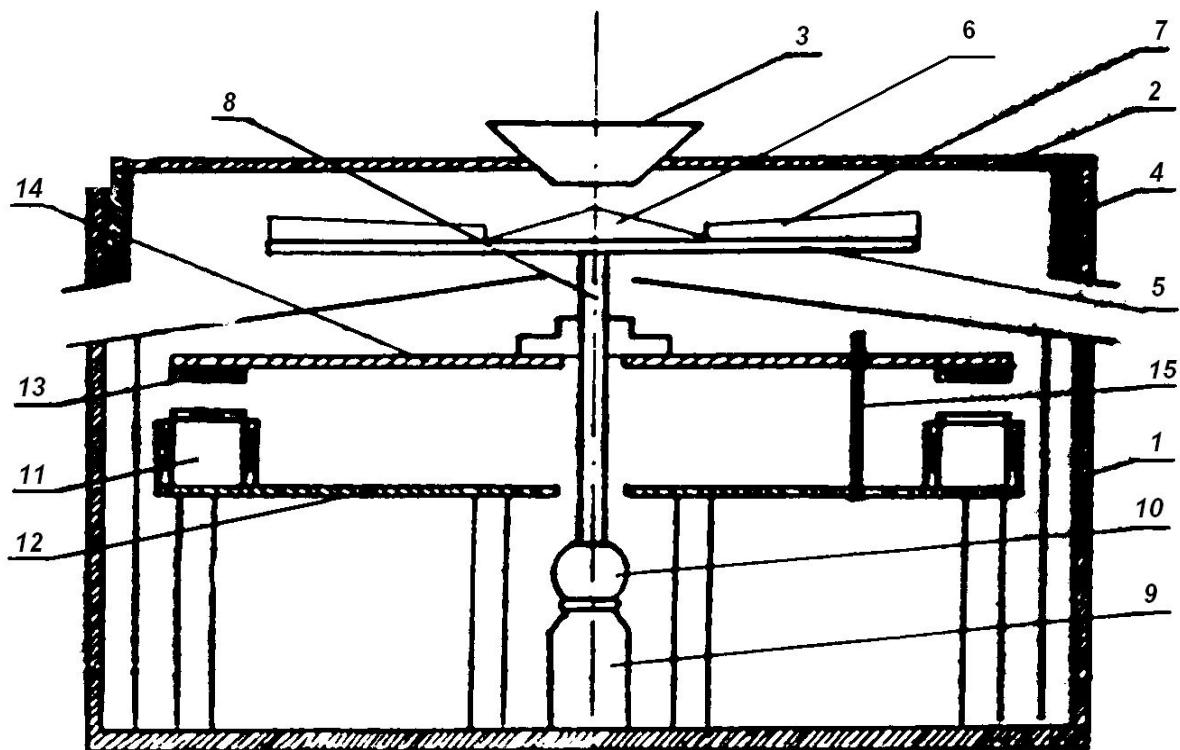


Рис. 1. Экспериментальная модель дробилки с магнитной подвеской ротора

Центробежная дробилка содержит цилиндрический корпус 1, закрытый сверху крышкой 2 с приемной воронкой 3 и снабженная разгрузочными бункерами. По периферии крышки 2 расположены отражательные плиты 4, установленные под углом к разгонному диску 5.

В центре камеры расположен ротор 6 с разгонным диском 5, ребрами 7, который установлен на вертикальном валу 8. Вал приводится во вращение от

электродвигателя переменного тока 9 через лепестковую муфту 10, а ротор при помощи подшипникового узла закреплен на подвижной платформе 14.

Особенностью конструкции является магнитный подвес ротора, выполненный в виде магнитной системы, состоящей из электромагнитов постоянного тока 11 и постоянных магнитов 13.

В результате взаимодействия магнитных полей постоянных магнитов и электромагнитов устраняется радиальная сила вибрации подвижной части ротора при его неравномерной загрузке и под действием электромагнитных сил движения платформа поднимается вверх на высоту  $h = 5 - 10$  см и обеспечивается магнитный подвес ротора центробежной дробилки. При этом уменьшаются усилия, которые действуют на подшипник ротора, а также устраняется осевая вибрация ротора и подвижной платформы при неравномерной загрузке ротора рудным материалом.

На рис. 2 представлен график зависимости  $h = f(I\omega)$ ,  $h = f(B)$  при постоянном весе платформы  $G = 7,625$  кг.

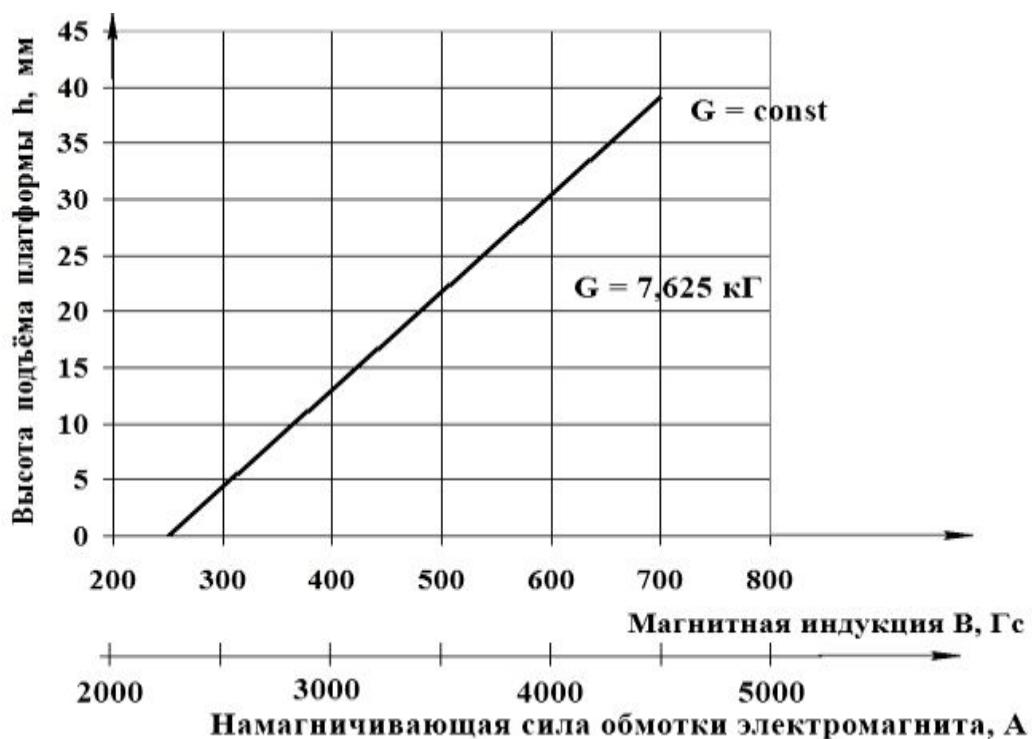


Рис. 2. Зависимость высоты подъема платформы от магнитной индукции при постоянном весе платформы при  $B_{\text{ПМ}} = 500$  Гс

Как следует из графика, высота подъема платформы прямо пропорциональна намагничивающей силе обмотки электромагнита.

На рис. 3 представлен график зависимости силы отталкивания ПМ и ЭМ

от намагничивающей силы обмотки электромагнита, от магнитной индукции на поверхности полюса электромагнита.  $P = f(B_{ЭМ})$  (для постоянного магнита с  $B = 500$  Гс = 0,05 Тл на поверхности полюса) при постоянной высоте подъема  $h = 20$  мм.

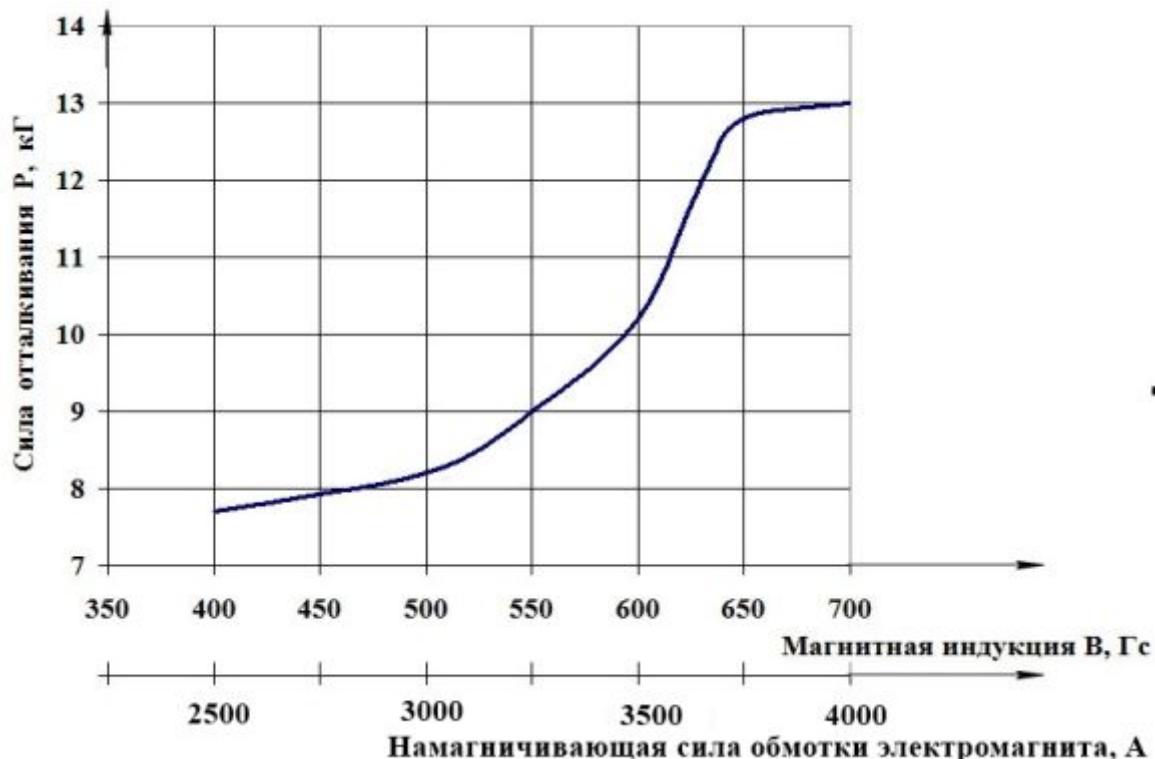


Рис. 3. Зависимость силы отталкивания от магнитной индукции на поверхности полюса электромагнита при постоянном воздушном зазоре

Как следует из представленных графиков, при изменении индукции на поверхности полюса электромагнита в пределах от 400 до 650 Гс зависимость силы от индукции квадратичная (парабола), а при дальнейшем росте индукции величина силы отталкивания остается практически постоянной, что может быть объяснено размагничиванием постоянного магнита под действием магнитного поля электромагнита.

Следовательно, существует зона значений индукции, которые могут рационально использоваться для регулирования силы взаимодействия ПМ и ЭМ.

С использованием результатов исследований на лабораторной модели центробежной дробилки с магнитной подвеской ротора разработан полупромышленный образец дробилки с магнитной подвеской ротора производительностью 10 т/ч ЦД-10. Испытания разработанной конструкции дробилки в

полупромышленных условиях подтвердили высокую эффективность и надежность системы демпфирующей магнитной подвески ротора, позволяющей эффективно компенсировать конструктивные и технологические дисбалансы быстровращающегося ротора дробилки.

Разработанная конструкция магнитного подвеса рекомендуется к применению на аналогичных конструкциях центробежно-ударных дробилок.

### **Выводы:**

1. Теоретически и экспериментально обоснована возможность применения магнитной подушки для подвески быстровращающегося ротора центробежной дробилки.

2. Разработана и изготовлена экспериментальная модель центробежно-ударной дробилки с демпфирующей магнитной подвеской ротора.

3. Проведены экспериментальные исследования центробежной дробилки с разработанной конструкцией магнитной подвески ротора, установлены зависимости параметров магнитной подвески от режимов работы дробилки.

4. На основании результатов проведенных исследований разработан полупромышленный образец центробежной дробилки с магнитным подвесом ротора ЦД-10 производительностью 10 т/ч.

5. Испытания разработанной конструкции подтвердили высокую эффективность и надежность системы демпфирующей магнитной подвески ротора, позволяющей эффективно компенсировать конструктивные и технологические дисбалансы быстровращающегося ротора дробилки.

**Список литературы:** 1. Вышков Ю.Д. Магнитные опоры в автоматике / Ю.Д. Вышков, В.И. Иванов. – М.: Энергия, 1978. – 160 с. 2. Маслов А.Г. Оборудование для дробления строительных материалов: монография / А.Г. Маслов, Л.М. Сокур, И.Н. Сокур. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2010. – 212 с. 3. Постоянные магниты: справочник / [под ред. Ю.М. Пятила]. – М.: Энергия, 1978. – 367 с. 4. Сокур Н.И. Центробежные дробилки: монография / Н.И. Сокур, Л.М. Сокур, И.Н. Сокур. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2009 – 204 с. 5. Сокур М.І. Енергомаркетинг в рудопідготовці: монографія / М.І. Сокур, А.М. Турило, І.М. Сокур. – Кременчук, ПП Щербатих О.В., 2007. – 256 с.

*Поступила в редакцию 26.07.11*

**В.П. НАДУТЬЙ**, докт. техн. наук,  
зав. отделом, ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск,  
**И.П. ХМЕЛЕНКО**, канд. техн. наук,  
мл. научн. сотрудн., ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск,  
**П.В. ЛЕВЧЕНКО**, аспирант, ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА**

В статті представлені експериментальні залежності продуктивності вертикального вібраційного грохоту від режимних параметрів його роботи, які дозволяють підібрати раціональні параметри процесу класифікації або здійснити синтез технологічних і регульюючих показників устаткування технологічної лінії.

В статье представлены экспериментальные зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от режимных параметров его работы, позволяющие подобрать рациональные параметры процесса классификации или осуществить синтез технологических и регулирующих показателей оборудования технологической линии.

In paper experimental dependences of productivity of a vertical vibrating screen on its regime parametres are presented. They allow to pick up rational parametres of screening process or to carry out synthesis of technological and regulating indicators of the equipment of a technological line.

Вибрационная классификация горной массы по крупности является одной из основных операций при переработке минерального сырья. Данная операция получила широкое распространение в различных отраслях промышленности, таких как горная, строительная, металлургическая, химическая, пищевая, а также при переработке техногенного сырья. На всех этих предприятиях эксплуатируется более тысячи различных типоразмеров вибрационных грохотов, различных по конструкциям и режимам работы. При наличии такого большого типоразмерного ряда конструкций грохотов, отсутствует универсальность по области их эксплуатации. Применение виброгрохотов с возможностью варьирования режимными и конструктивными параметрами в больших диапазонах позволит расширить область их использования, а также повысить технологические показатели.

Дальнейшее совершенствование конструкций грохотов является очень

актуальной задачей, особенно для классификации горной массы тонкой и особо тонкой крупности. Кроме этого, предъявляются особенные требования к новым конструкциям виброгрохотов в условиях современного рынка горных машин, такие как низкая энерго- и металлоемкость, высокая эффективность и удельная производительность, а также долговечность рабочих органов. В такие рамки производство грохотов ставится в обстановке повышающихся требований к качеству производимого сырья и промежуточных продуктов, увеличения переработки низкосортного сырья, а также роста цен на электроэнергию и расходные материалы.

В Институте геотехнической механики НАН Украины авторами разработана конструкция вертикального вибрационного грохota (ВВГ) [1] изображенная на рис. 1, которая позволяет решить несколько проблем.

Во-первых, при занимаемом пространстве в  $1,5 \times 1,5 \times 2$  м и массе разработанной конструкции 530 кг она имеет  $3,2 \text{ м}^2$  просеивающей поверхности, а также мощность привода составляет всего лишь 0,74 кВт, что на порядок меньше, чем у аналогичных по колеблющейся массе машин для классификации минерального сырья.

Во-вторых, при работе в стадии измельчения ВВГ позволяет также решить проблему разгрузки мельниц с последующим транспортирование материала и его технологической обработкой, вместо галерей из конвейеров и плоских грохотов, что существенно сэкономит занимаемую площадь линии измельчения во много раз, а также энергопотребление линии.

Принцип работы ВВГ (рис. 1) следующий: при работе вибровозбудителей 4 колонна 3 совершаet винтовые колебания в своей плоскости, при которых на рабочей поверхности 6 в виде рам (с размерами  $0,5 \times 0,8$  м) с резонирующими ленточно-струнным ситом (РЛСС) образуется специальный поликчастотный режим ее работы. Материал, загруженный в приемный бункер 10, перемещается вниз по просеивающей поверхности в виброкипящем слое до разгрузочной течки 12. Скорость движения материала вниз по рабочему органу можно регулировать изменением угла наклона рам в участках пересыпа 7 с одной рамы на другую. По пути материал разделяется на несколько фракций и каждая из них может разгружаться через соответствующие шиберные задвижки 9, а на выходе из грохота через течку 11. Количество разделяемых фракций можно регулировать, уменьшив или увеличив количество рам РЛСС. С целью уменьшения запыленности рабочего помещения грохот имеет герметично закрывающийся кожух 13.

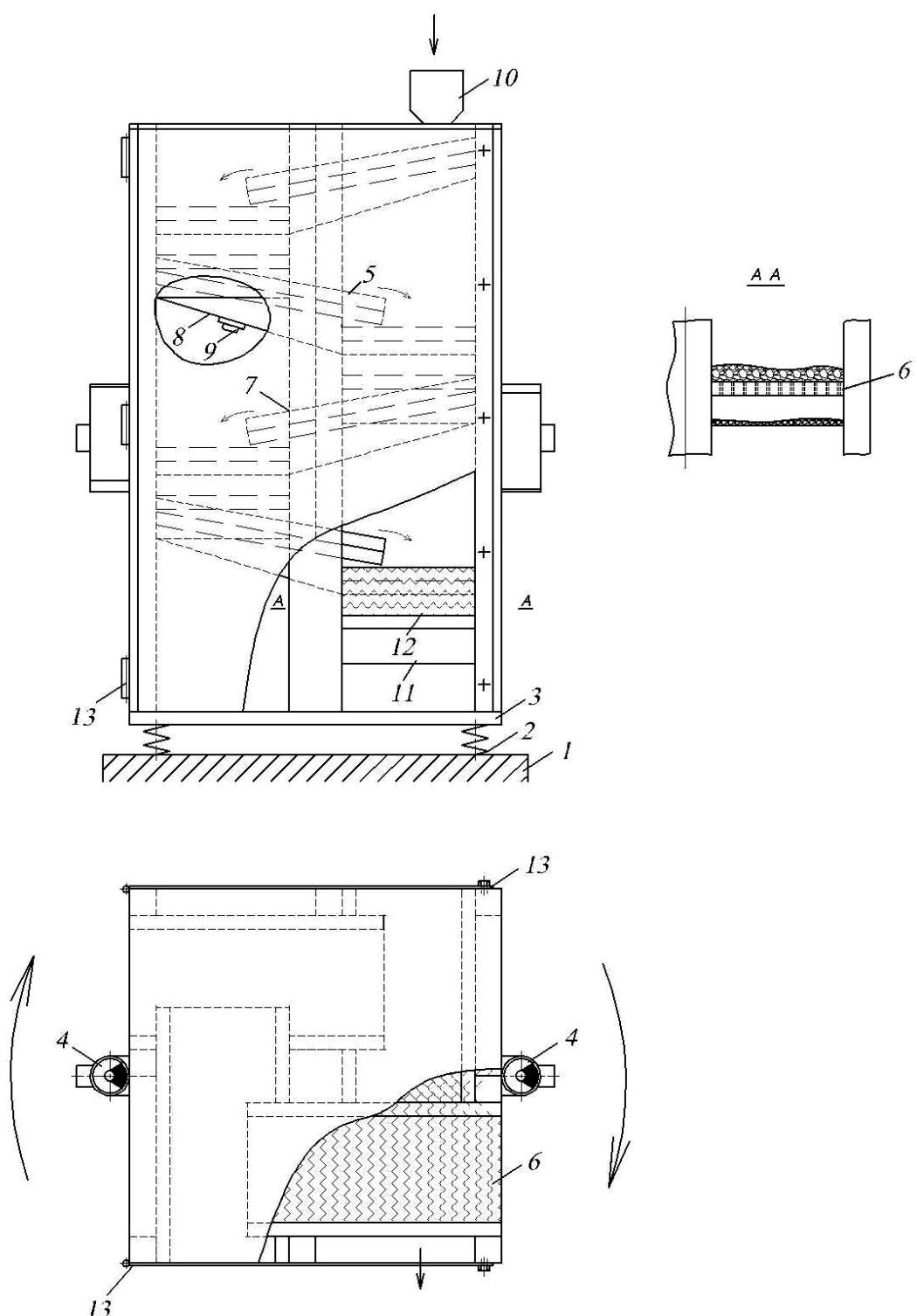


Рис. 1. Конструктивная схема вертикального вибрационного грохота:

- 1 – рама;
- 2 – амортизаторы;
- 3 – несущая колонна;
- 4 – вибровозбудитель;
- 5 – наклонная спираль;
- 6 – карта РЛСС;
- 7 – механизм изменения угла рамы;
- 8 – желоб;
- 9 – шиберная задвижка;
- 10 – приемный бункер;
- 11,12 – разгрузочная течка подрешетного и надрешетного продуктов;
- 13 – кожух.

При грохочении материала тонкой и особо тонкой крупности применяются стальные и латунные сетки с необходимым размером ячейки, которые

укладываются поверх рам РЛСС, способствующим интенсификации процесса классификации, за счет своей динамической активности при работе в резонансном режиме с виброприводом.

Существенное отличие ВВГ от распространенных в промышленности плоских горизонтальных грохотов с круговыми либо направленными колебаниями рабочего органа заключается в наличии вращающих моментов и центробежных сил, которые возникают при работе вибровозбудителей. Соответственно, появляется необходимость в экспериментальном изучении данной конструкции, в которой зависимости технологических показателей грохочения могут отличаться от аналогичных на плоских грохотах, за счет существенно иного вибровозмущения.

Выполненные авторами работы [2, 3] показали существенные отличия как технологических показателей на ВВГ, так и их зависимостей от конструктивных и режимных параметров. В работе [3] определялась зависимость эффективности грохочения от режимных параметров ВВГ, но для полного моделирования работы грохота необходимо учесть, что данный технологический показатель в первую очередь зависит от скорости движения материала по рабочему органу, т.е. времени нахождения грохотимой массы на сите, которое характеризуется производительностью грохота. Следовательно, возникла задача определения производительности грохота в пределах регулируемых режимных параметров, при которых достигаются наиболее эффективные показатели процесса классификации.

**Целью данной работы** является определение зависимости производительности вертикального вибрационного грохота (пропускной способности) от его режимных параметров.

В качестве режимных параметров на ВВГ приняты следующие:

- 1) амплитуда колебаний грохота  $A$ , мм;
- 2) частота вращения вала вибровозбудителя  $\omega$ , об/мин;
- 3) угол направления возмущающей силы относительно горизонта  $\beta$ , град.

В качестве экспериментального материала был использован сухой шлаковый отсев плотностью  $\rho = 2 \text{ г}/\text{см}^3$  класса (-10мм), с содержанием класса (-3)  $\gamma = 34 \%$  в исходном продукте. Остальные параметры были постоянными: размер ячейки РЛСС  $d = 3 \text{ мм}$ , длина просеивающей поверхности  $L = 3,2 \text{ м}$ , удельная нагрузка на грохот  $q = 2 \text{ т}/\text{ч}$ , угол наклона рабочего органа относительно горизонта  $\alpha = 8 \text{ град.}$

На рис. 2 представлена зависимость производительности грохota  $Q$ , т/ч от амплитуды колебаний грохота, которая варьировалась в пределах  $A = 1\dots4$  мм, для различных значениях частоты и угла направления колебаний.

Из рисунка видно, что с увеличением амплитуды колебаний производительность увеличивается по нелинейному закону, и особенная разбежность экспериментальных данных наблюдается с увеличении амплитуды колебаний при разных значения  $\omega$  и  $\beta$ .

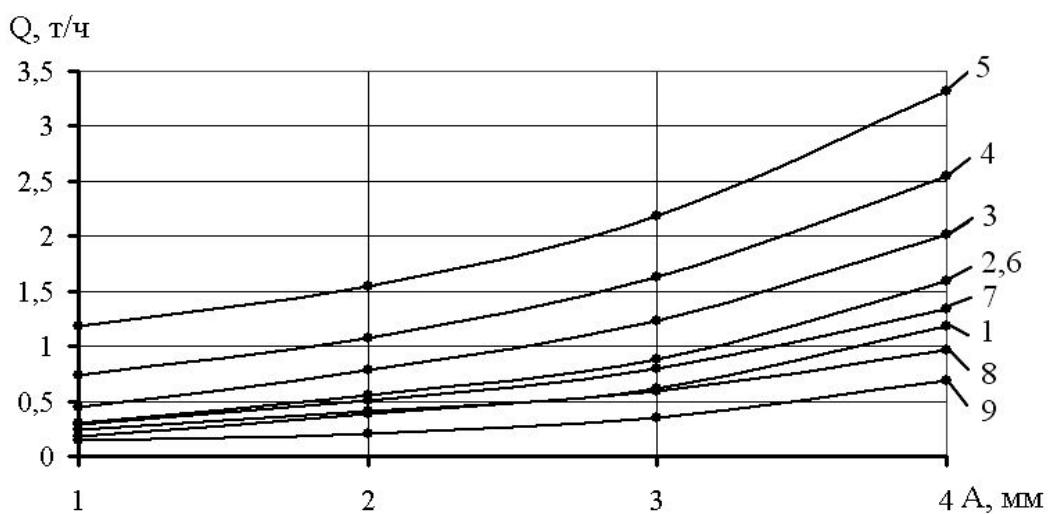


Рис. 2. Зависимость производительности грохота  $Q$  от амплитуды колебаний грохота  $A$  при различной частоте  $\omega$  и угле направления колебаний  $\beta$ :

1 –  $\omega = 1300$  об/мин; 2 –  $\omega = 1500$  об/мин; 3 –  $\omega = 1700$  об/мин; 4 –  $\omega = 1900$  об/мин;  
5 –  $\omega = 2100$  об/мин; 6 –  $\beta = 30$  град.; 7 –  $\beta = 45$  град.; 8 –  $\beta = 60$  град.; 9 –  $\beta = 90$  град.

Зависимость производительности грохота  $Q$  от частоты вращения вала вибровозбудителя  $\omega$  при различных значениях амплитуды колебаний и угла направления возмущающей силы представлено на рис. 3, из которого видно, что с увеличением частоты  $Q$  увеличивается по линейному закону при варьировании  $A$  и нелинейно повышается при повышении  $\omega$ .

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость  $Q$  от угла направления возмущающей силы  $\beta$  при различных вариациях амплитуды колебаний грохота и частоты возмущающей силы.

При увеличении параметра  $\beta$  наблюдается линейная зависимость при различных амплитудах колебаний, а при варьировании  $\omega$  прослеживается нелинейный характер зависимости, особенно это заметно при высоких значениях этого параметра.

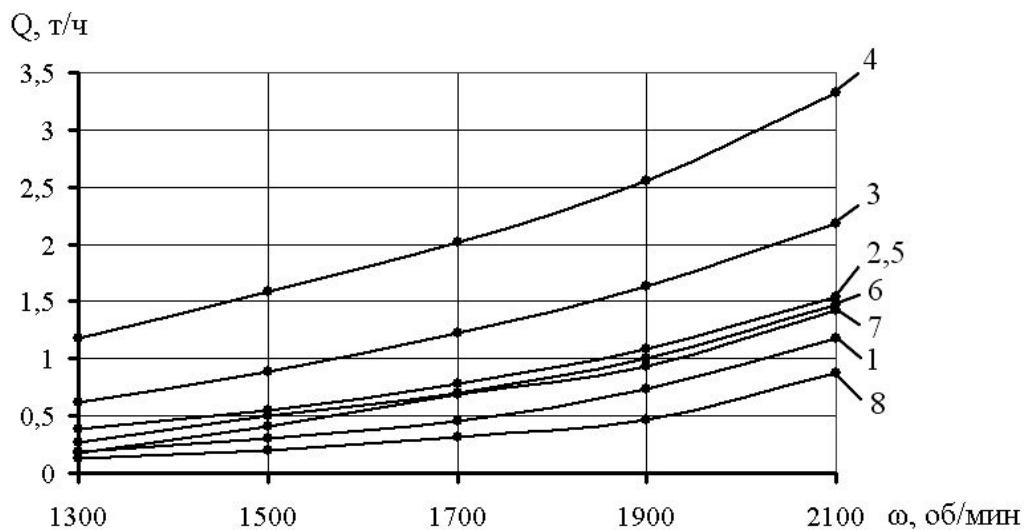


Рис. 3. Зависимость производительности грохота  $Q$  от частоты вращения вала вибровозбудителя  $\omega$  при различной амплитуде колебаний  $A$  и угле направления возмущающей силы  $\beta$ :

1 –  $A = 1\text{мм}$ ; 2 –  $A = 2\text{мм}$ ; 3 –  $A = 3\text{мм}$ ; 4 –  $A = 4\text{мм}$ ;  
5 –  $\beta = 30$  град.; 6 –  $\beta = 45$  град.; 7 –  $\beta = 60$  град.; 8 –  $\beta = 90$  град

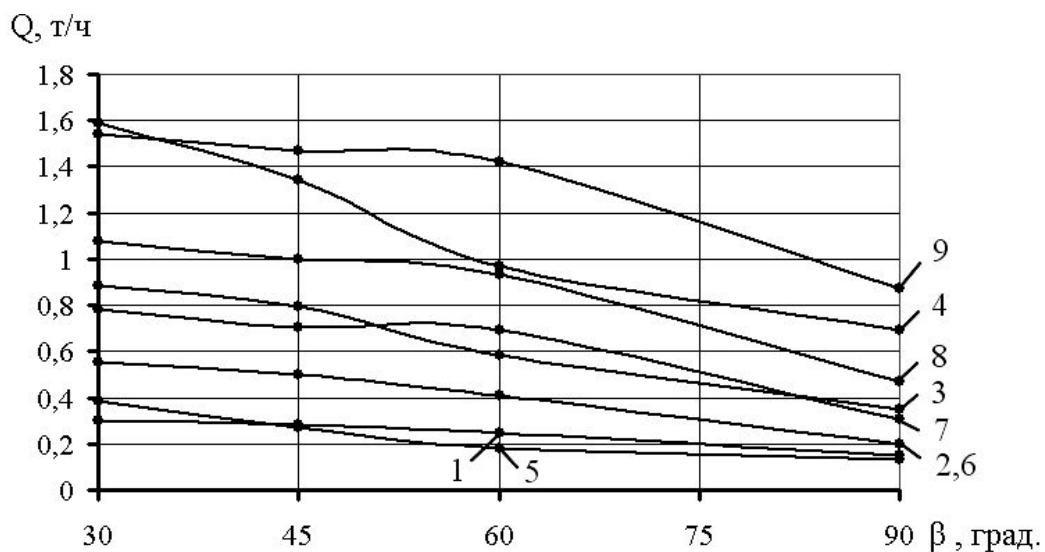


Рис. 4. Зависимость производительности грохота  $Q$  от угла направления возмущающей силы  $\beta$  при различной амплитуде колебаний  $A$  и частоте вращения вала вибровозбудителя  $\omega$ :

1 –  $A = 1\text{мм}$ ; 2 –  $A = 2\text{мм}$ ; 3 –  $A = 3\text{мм}$ ; 4 –  $A = 4\text{мм}$ ; 5 –  $\omega = 1300$  об/мин;  
6 –  $\omega = 1500$  об/мин; 7 –  $\omega = 1700$  об/мин; 8 –  $\omega = 1900$  об/мин; 9 –  $\omega = 2100$  об/мин.

## Выводы.

В результате проведенных экспериментальных исследований, была установлена зависимость производительности вертикального вибрационного грохота от его режимных параметров, позволяющая повысить эффективность

работы цикла измельчения на предприятиях.

Кроме этого грохот имеет высокие технологические показатели классификации за счет реализуемого им специального полигармонического режима работы рабочего органа, при котором частицы материала на просеивающей поверхности совершают пространственно стохастическое вращение относительно проекции ячейки сита.

Разработанная новая конструкция вертикального вибрационного грохота позволяет в одном аппарате совместить три операции: перегрузка, транспортировка и классификация минерального сырья.

При этом полученные зависимости позволяют выбрать рациональные параметры процесса или осуществить синтез технологических и регулируемых показателей оборудования технологической линии.

**Список литературы:** 1. Пат. 53632 UA, МПК В 07 В 1/40. Вертикальний вібраційний грохот / Надутий В.П., Левченко П.В., Кіжло Л.А.; заявник і патентовласник ГТМ НАНУ; заявл. 26.04.10; опубл. 11.10.10, Бюл. № 19. 2. Надутый В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от конструктивных параметров вертикального вибрационного грохота / В.П. Надутый, П.В. Левченко // Збагачення корисних копалин. – 2011. – Вип. 45 (86). – С. 43 – 48. 3. Франчук В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от режимных параметров вертикального вибрационного грохота / В.П. Франчук, В.П. Надутый, П.В. Левченко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – Вып. 2 (62). – С. 73 – 76.

Поступила в редколлегию 26.07.11

**В.Д. РУДЬ**, докт. техн. наук, проф., ЛНТУ, Луцьк,  
**Т. Н. ГАЛЬЧУК**, канд. техн. наук; ст. викладач, ЛНТУ, Луцьк

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ПОРОШКІВ СТАЛІ ШХ15, ОТРИМАНИХ ІЗ ВІДХОДІВ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА В КУЛЬОВИХ МЛИНАХ**

Процес подрібнення складається з субпроцесів (активів), які включають функцію подрібнення і функцію відбору, що повторюються. Тому за основу алгоритму математичної моделі взято диференціальне рівняння, що описує кінетику процесу подрібнення. А також рівняння матеріального балансу, що описує процес класифікації. Запропонована модель зручна для імітації різних режимів подрібнення в ході розв'язання задач оптимального управління.

Процесс измельчения состоит из субпроцессов (актов), которые включают функцию измельчения и функцию отбора, что повторяются. Поэтому за основу алгоритма математической модели взяты дифференциальное уравнение, описывающее кинетику процесса измельчения. А также уравнение материального баланса, описывающие процесс классификации. Предложенная модель удобна для имитации различных режимов измельчения в ходе решения задач оптимального управления.

The process of grinding consists of subprocesses (acts), which include grinding and selection functions, which are repeated. Therefore, a differential equation that describes the kinetics of the process of grinding was taken as base of an algorithm of mathematical model. As well as material balance equation that describes the process of classification. An introduced model is suitable for simulation of different regimes of grinding during solution problems of optimal control.

Процес подрібнення полягає в руйнації твердих тіл послідовною серією механічних впливів. При цьому на процес впливають різноманітні фактори пов'язані з властивістю матеріалу, що руйнується; видом енергії, яка прикладається; параметрами подрібнювача, що застосовується. Кінцевий результат подрібнення залежить, головним чином, від прикладеної енергії. В даний час відомі декілька експериментально встановлених законів кожен з яких спрвджується тільки в області порівняно грубої дисперсності [1, 2]. Для математичного опису гранулометричного складу, продуктів подрібнення багатьма авторами запропоновано математичні залежності, які не можуть бути універсальними, оскільки ґрунтуються на деяких допущеннях і визначені умовностях, а дослідні криві характеристик крупності мають значно різноманітні форми. Продукти механічного подрібнення твердих матеріалів складаються із суміші частинок, розмір і форма яких коливаються в широких ме-

жах. Для повної характеристики їх дисперсності необхідно знати гранулометричний склад, тобто відносний вміст зерен кожного розміру.

Мета роботи полягає в побудові найбільш наближеної до реального процесу подрібнення, математичної моделі. Даною моделлю дозволить: визначити оптимальні режими роботи кульового млина, передбачити характеристики продуктів подрібнення за відомими характеристиками початкового матеріалу і режимах роботи млина.

Об'єктом математичного моделювання є кульовий млин в сукупності з процесом класифікації. При моделюванні прийняті наступні допущення: розподіл частинок в млині і на контрольних ситах прийнятий рівномірним по всій поверхні, ефективність класифікації є величиною постійної і не змінюється в часі.

Для вибору необхідного в подальших дослідженнях простого і зручного рівняння кінетики розглядалися рівняння з одним параметром, зокрема теоретична формула А. Загустіна – В. Товарова, а також рівняння з двома параметрами: модифікованої формулі В. Товарова; рівняння Ж. Гундерманна; рівняння кінетики подрібнення К. Разумова.

В результаті дослідження експериментальним шляхом встановлено, що зміна подрібнення залишку залежить від його кількості в млині [3]. У процесі подрібнення змінюється міцність залишку, точніше його опір подрібненню, зменшується середній розмір зерен крупного класу, змінюється вірогідність попадання зерен крупного класу в зону удару між кулями. Спільний вплив цих факторів на подрібнення може збільшувати або зменшувати подрібнення крупного класу з часом. Також в процесі подрібнення число слабких місць в зернах подрібнюваного матеріалу, по яких в основному розколюються зерна, зменшується і опір злому частинок, що залишилися, збільшується, тобто матеріал ніби зміцнюється під час подрібнення.

При такому тлумаченні подрібнення в млині можна прогнозувати, як підвищується подрібненість крупного класу з плином часу для окремих матеріалів.

Для експериментальної перевірки рівнянь кінетики використали порошок порошок сталі ШХ15, отриманий із шліфошламів. Подрібнення відноситься до числа основних технологічних процесів утилізації шліфувальних шламів [4]. На його реалізацію припадає значна частина експлуатаційних витрат. Операція подрібнення – процес механічного руйнування часток порошків сталі ШХ15, призначений для максимально можливого подрібнення по-

чаткових часток та надання їм регулярної форми. Регулювання циклу подрібнення зводиться до забезпечення максимальної продуктивності млина при заданій гранулометричній характеристиці подрібненого класу. Від якісно-кількісних показників подрібнення залежать результати всієї подальшої переробки продукту, перш за все, такі як формуюмість, однорідність властивостей по об'єму, продуктивність процесу отримання готових виробів.

Подрібнення проводилося в кульовому млині із зміщеною віссю обертання внутрішнім  $\varnothing$  170 мм. В якості розмольних тіл використовувались сталеві кулі  $\varnothing$  23 мм. Дослідження проводилося протягом 4 і 8 год при співвідношенні маси порошку до маси розмольних тіл 1 : 0,75. Після подрібнення порошок постачався на ситовий аналіз. Форма часток порошку досліджувалася методом електронної мікроскопії. Переважна кількість часток порошку міститься в діапазоні фракцій – 0,2 + 0,05. Це свідчить про те, що при розмелюванні необхідно забезпечити такий режим, який, з одного боку, виправлює форму часток і, з другого – їх подрібнює. Такий режим досягається підбором відповідної частоти обертання млина ( $0,75...0,8$ )  $n_{\text{кр}} = 77,1 \text{ хв}^{-1}$ , при якій реалізується ударна і стираюча дія розмельних тіл [5].

Подрібнення часток порошку здійснюється двома механізмами. Перший пов'язаний з крихким руйнуванням. Йому сприяє наявність залишків абразивних матеріалів у вигляді включень на поверхні часток, які виступають як концентратори напруг. Реалізація цього механізму забезпечується ударною дією куль. Другий механізм пов'язано з пластичними деформаціями часток порошку і він обумовлюється стираючою дією сталевих куль.

Результати досліджень подрібнення порошку сталі ШХ15 показали, доцільність використання рівняння кінетики з двома параметрами, зокрема проф. К. Разумова, оскільки дане рівняння найбільш підходить для побудови математичної моделі гранулометричного складу даного порошку. В середньому, відхилення розрахункових даних від дослідних складає до 1 % (рис. 1).

Для розрахунків використовували рівняння кінетики:

$$R = R_0 \times p / (e^{kpt} + p - 1),$$

що отримане із початкового:

$$\frac{dR}{dt} = -k \times R \times m,$$

де  $R$  – кількість великого неподрібненого класу в матеріалі, що рівна залишку на ситі до моменту часу  $t$ , % або долі од.;  $t$  – час подрібнення;  $k$  – постійний параметр, що залежить від умов подрібнення та властивостей матеріалу, який подрібнюється;  $m$  – відносна подрібнюваність залишку, тобто відношення подрібнюваності залишку вений момент часу до подрібнюваності в початковий момент.

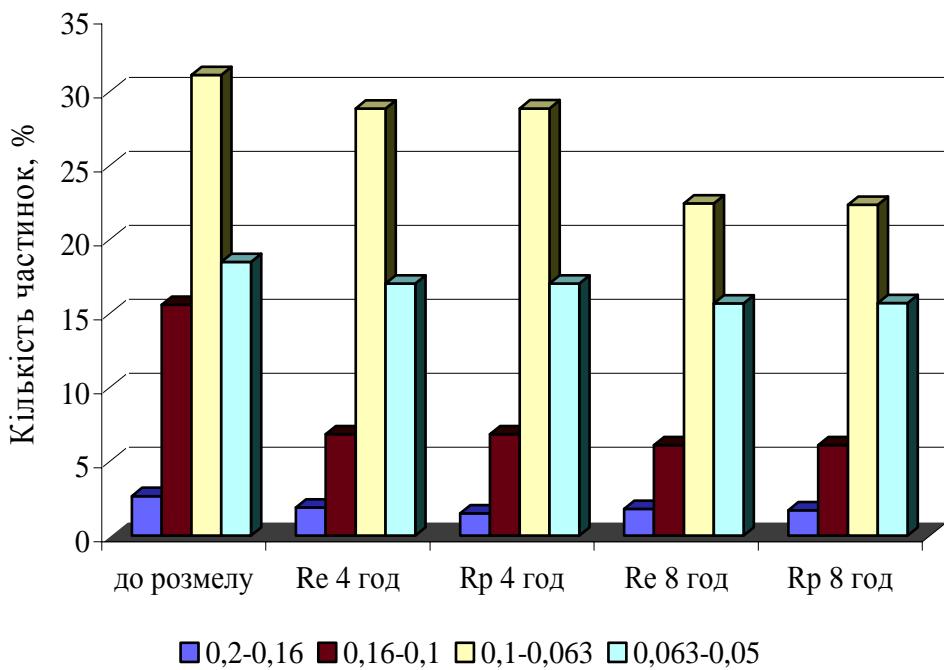


Рис. 1. Розрахункові за рівнянням та дослідні дані обкатування – подрібнення порошку ШХ15 кульками  $\varnothing 23$  мм

Це рівняння задовольняє обидві граничні умови процесу: при  $t \rightarrow 0$  відносна швидкість подрібнення дорівнює  $k$  при  $t \rightarrow \infty$ , тобто при  $R = 0$ , швидкість подрібнення має цілком визначену величину  $k \times p$ .

Для визначення параметрів  $p$  та  $k$  використовувались рівняння:

$$p = \left[ 1 + R_0 \times \left( \frac{1}{R_2} - \frac{2}{R_1} \right) \right] / \left( \frac{R_0}{R_1} - 1 \right)^2, \quad k = \ln \left( \frac{R_0 \times p}{R} + 1 - p \right) / (p \times t).$$

Параметри знаходили аналітичним шляхом за двома експериментальними точками для кожної кінетичної кривої, тобто за двома значеннями  $R_1$  та  $R_2$  при різному часі  $t_1$  і  $t_2$ , для підвищення точності розрахунків знайдені значення усереднюються.

Параметр  $p$  характеризує властивості подрібнювального матеріалу (міцність і подрібнюваність), його значення для даного матеріалу і класу є ста-лим.

Параметр  $k$  характеризує швидкість подрібнення в початковий момент, визначає нахил кінетичної кривої до осі абсцис на початку процесу і, як наслідок цього, вигляд кривої впродовж інших періодів подрібнення.

Параметр  $k$  прямим чином залежить від розмірів млина, способу подрібнення, набору і величини куль і т.п.

Підставляючи значення параметра  $k$  для кожного з випадків, отримуємо значення кількості крупного класу для визначеного часу.

Згідно з вищесказаним, виведено рівняння кінетики для кожного з досліджуваних класів і побудовано графіки, що зображують кінетику подрібнення кожного з класів (рис. 2).

Наприклад, для класу 016:  $R = 0.043794 \times R_0 / (e^{0.043794 k t} - 0.956206)$ .

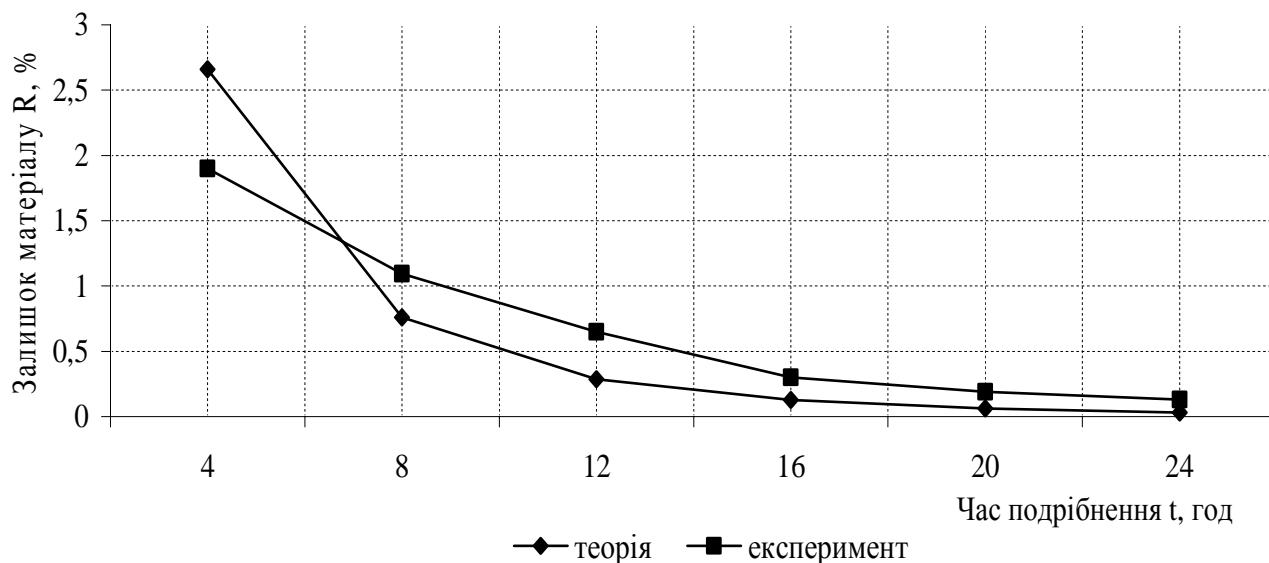


Рис. 2. Кінетика подрібнення матеріалу за класом 016

Загальна закономірність подрібнення зберігається і для порошків без попередньої класифікації (рис. 3).

Проведений аналіз методик визначення подрібнення матеріалів вказує на те, що значний вплив на точність розрахунків має початкова форма подрібнювального матеріалу.

Найбільш точно процес подрібнення металічного порошку сталі ШХ15 математично описує рівняння кінетики проф. К. Разумова. Це рівняння можна використовувати для прогнозування кінетики подрібнення порошкових

матеріалів, частинки яких деформовані в різних напрямах і мають сильно розгалужену поверхню. Саме до таких порошкових матеріалів належать порошки сталі ШХ15, отримані із шліфошламів.

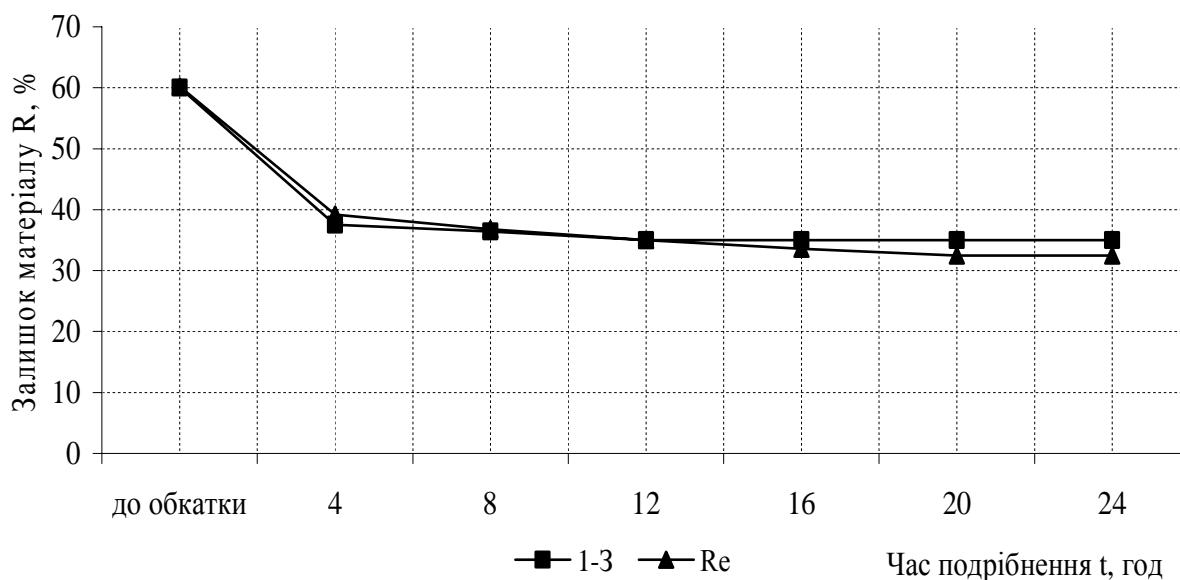


Рис. 3. Залежність залишку порошку R від терміну

обкатування – подрібнення (без класифікації):

1 – 3 – розрахункові дані для порошку після шліфування загартованих деталей;

Re – експериментальні дані.

**Список літератури:** 1. Беленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах / Л.Ф. Беленко. – М.: Недра, 1984. – 200 с. 2. Петров В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учебное пособие для вузов / В.А. Петров, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко. – М.: Недра, 1990. – 301 с. 3. Рудь В.Д. Дослідження процесів подрібнення металевих порошків / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук // Наукові нотатки. – 2009. – Вип. 25. – С. 306 – 310. 4. Рудь В.Д. Использование отходов подшипникового производства в порошковой металлургии / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук, О.Ю. Повстяной // Порошковая металлургия. – 2005. – № 1/2. – С. 106 – 112. 5. Дзнеладзе Ж.И. Порошковая металлургия сталей и сплавов / [Ж.И. Дзнеладзе, Р.П. Щеголева, Л.С. Голубева и др.]. – М.: Металлургия, 1978. – 264 с.

*Надійшла до редколегії 12.06.11*

**И.В. РУССУ**, докт. хаб. техн. наук, проф., ТУМ, Кишинэу,  
**В.М. ПРИСАК**, докторант, ТУМ, Кишинэу,  
**И. КИРИКУЦА**, докторант, ТУМ, Кишинэу,  
**И. КОНСТАНТИНЕСКУ**, докторант, университет «Нижний Дунай»,  
Галаць, Румыния

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ И СВОЙСТВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Наведені результати досліджень по створенню систем лакофарбових покривтів, що володіють високою адгезією, тріщиностійкістю, хімічної стійкістю і механічною міцністю, низькою набрякливістю і проникністю, призначених для захисту залізобетонних конструкцій, експлуатованих в умовах дії сильноагресивних кислих середовищ.

Приведены результаты исследований по созданию систем лакокрасочных покрытий, обладающих высокой адгезией, трещиностойкостью, химической стойкостью и механической прочностью, низкой набухаемостью и проницаемостью, предназначенных для защиты железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия сильноагрессивных кислых сред.

The results of a study on creation of coatings with high adhesion, fracture toughness, chemical resistance and mechanical strength, low swelling and permeability for the protection of concrete structures, operated in conditions of acidic environments silnoagressivnyh.

**Введение.** Большинство систем лакокрасочных покрытий для противокоррозионной защиты бетона конструкций состоят из грунтовки, шпатлевки и эмали. Но при эксплуатации железобетонных конструкций в сильноагрессивных средах, в частности кислых, требуется усовершенствованные системы и составы покрытий и надежную их противокоррозионную защиту в таких условиях могут обеспечивать лакокрасочные покрытия, обладающие высокой адгезией, трещиностойкостью, химической стойкостью и механической прочностью, низкой набухаемостью и проницаемостью [1, 2]. Такими свойствами могут обладать покрытия определенной системы и состава.

Выбор системы покрытия должен производиться с учетом характера покрываемой поверхности бетона конструкций (шероховатости, пористости, влажности, щелочности и др.), условий эксплуатации железобетонных конструкций (воздействие статических, динамических или ударных нагрузок, пе-

ременный температурно-влажностный режим), степени агрессивного воздействия на бетонных конструкциях различных веществ (периодическое или постоянное воздействие газов, растворов кислот, щелочей, микроорганизмов, жиров и др.), других особенностей эксплуатации.

**Экспериментальная часть.** Величина адгезии лакокрасочных полимерных покрытий зависит как от свойств самой пропитывающей грунтовки (ее состава и вязкости, гидрофильтрности или гидрофобности по отношению к бетону, способностью образования с составляющими бетона различных связей), так и от состояния и свойств поверхностного слоя защищаемого бетона (влажности, пористости, шероховатости, механической прочности) [2].

Результаты исследований показали существенную зависимость адгезии полимерных лакокрасочных покрытий от их свойств, особенно грунтовок, и особенностей и свойств бетонного субстрата.

Анализ полученных результатов показывает (рис. 1 и рис. 2), что глубина пропитки ( $h$ , мм) слоя бетонного субстрата (при влажности  $V < 4 \%$ ) в значительной степени зависит от его пористости ( $P$ , %), а также от вязкости ( $\eta$ , с) и типа полимера лакокрасочного грунта.

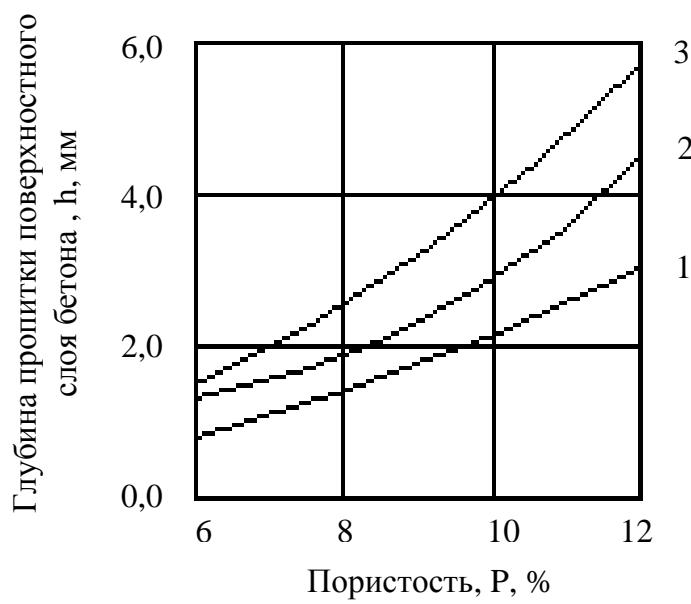


Рис. 1. Зависимость глубины пропитки ( $h$ , мм) слоя бетонного субстрата (при влажности  $V < 4 \%$ ) в значительной степени зависит от его пористости ( $P$ , %):  
 1 – грунт на основе хлорсульфированного полиэтилена, 2 – полиуретановый грунт,  
 3 – эпоксидный грунт

Но от величины пористости в значительной степени зависят прочностные свойства бетона и его проницаемость, поэтому она лимитируется опре-

деленными пределами. Пределы вязкости лакокрасочных материалов (включительно грунтов) также лимитированы их технологическими свойствами (тиксотропностью, особенностями оборудования для нанесения, требованиями к отсутствию наплывов и ровности нанесения и др.), поэтому глубина пропитки бетонного субстрата не может быть изменена в широких пределах.

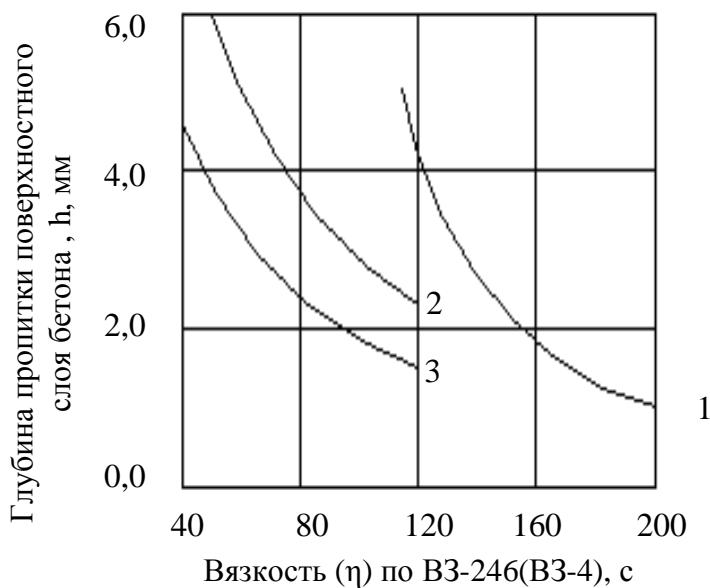


Рис. 2. Зависимость глубины пропитки ( $h$ , мм) слоя бетонного субстрата (при  $V < 4\%$ ,  $P = 8\%$ ) от вязкости ( $\eta$ , с) и типа полимера лакокрасочного грунта:  
1 – грунт на основе хлорсульфированного полиэтилена, 2 – полиуретановый грунт,  
3 – эпоксидный грунт

Взаимосвязь между величиной адгезии ( $A$ , МПа) лакокрасочного покрытия, пористостью бетонного субстрата ( $P$ , %), глубиной его пропитки ( $h$ , см) и типа полимера показана на (рис. 3 и рис. 4). Выявленная взаимосвязь свидетельствует о том, что независимо от типа полимера лакокрасочного грунта, максимальная адгезия последнего обеспечивается при пористости бетонного субстрата в пределах 4...8 % и при глубине его пропитки в пределах 4...8 мм.

Выявленные зависимости позволяют выбрать условия, обеспечивающие максимальную адгезию лакокрасочных покрытий к бетонному субстрату.

Нормы рационального проектирования и изготовления железобетонных конструкций допускают образование и раскрытие в большинстве из них трещин определенной ширины [3].

В случаях когда эти конструкции эксплуатируются в агрессивных средах и защищаются лакокрасочными покрытиями последние должны обладать оп-

ределенной трещиностойкостью. Известные трещиностойкие тиоколовые, наиритовые и хлорсульфированные полиэтиленовые покрытия не всегда могут быть использованы как самостоятельные ввиду их недостаточной химической стойкости, низкой адгезии к бетону или высокой токсичности [4].

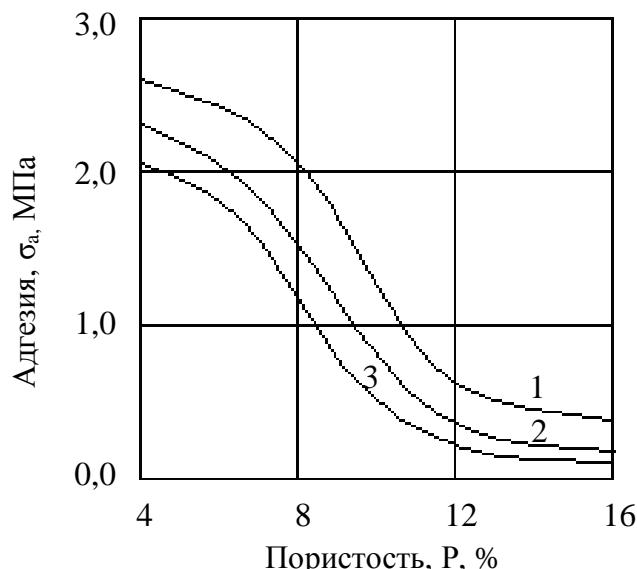


Рис. 3. Взаимосвязь между величиной адгезии ( $A$ , МПа) лакокрасочного покрытия и пористостью бетонного субстрата ( $P$ , %) при влажности  $V < 4\%$ :

1 – грунт на основе хлорсульфированного полиэтилена, 2 – полиуретановый грунт,  
3 – эпоксидный грунт.

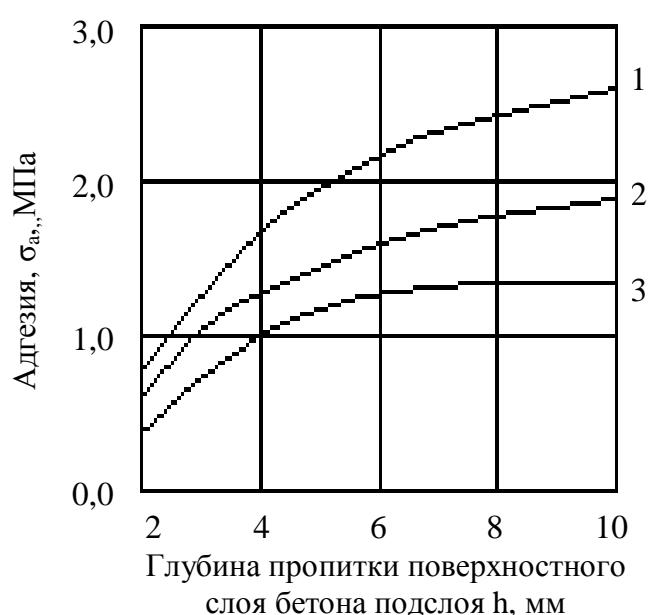


Рис. 4. Взаимосвязь между величиной адгезии ( $A$ , МПа) лакокрасочного покрытия и глубиной его пропитки ( $h$ , см) при  $V < 4\%$ ,  $P = 8\%$ :

1 – грунт на основе хлорсульфированного полиэтилена, 2 – полиуретановый грунт,  
3 – эпоксидный грунт

Исследования различных систем покрытий позволили выбрать для противокоррозионной защиты бетона конструкций, эксплуатируемых в сильноагрессивных средах, систему покрытия (рис. 5), состоящую из пропитывающей грунтовки, эластичного подслоя, промежуточного подслоя и покровного эмалевого слоя.

Образование трещин (4) в покрытиях (S) является следствием ряда физико-механических и химических факторов. В целом же образование трещин является результатом деформации бетона (1) выше его предела относительных удлинений в данных условиях. В практике трещинообразование связано с хрупким разрушением и трещиностойкость может быть достигнута, либо снижением хрупкости защитных покрытий, либо уменьшением допускаемых деформаций в защищаемом материале.

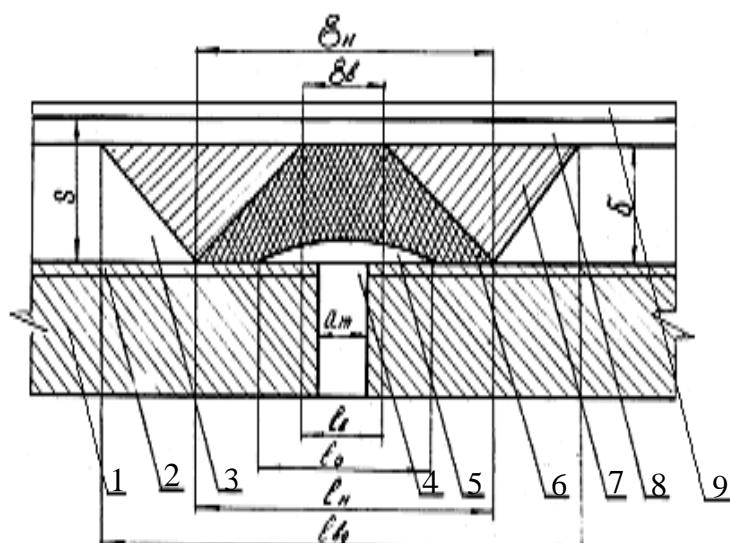


Рис. 5. Система покрытия

Основным требованием обеспечения целостности трещиностойкого покрытия является условие его неразрывности:

$$\sigma_{\text{п}} < R_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{п}}$  – напряжение в покрытии, МПа;  $R_{\text{пр}}$  – прочность покрытия при разрыве, МПа.

Условие целостности покрытия может быть выполнено, если предельные деформации растяжения ( $\varepsilon_p$ ) полимерного покрытия больше ширины

раскрытия трещин ( $a_m$ ), т.е.  $(\varepsilon_p) > (a_m)$ . При этом адгезия полимерного покрытия ( $\sigma_a$ , МПа) должна быть больше прочности бетона на разрыв ( $R_{bp}$ , МПа):

$$\sigma_a > R_{bp}. \quad (2)$$

В момент образования трещины (4) в бетонной подложке (1) происходит мгновенное приложение нагрузки лишь к слою, находящемуся в контактной зоне (5) с бетоном. Следовательно, напряжения возникают вначале в этом слое и он может оторваться от бетона.

В зависимости от упругопластических свойств подслоя (3) покрытия, напряжения в нем (6) будут снижаться по толщине ( $\delta$ ) эластичного деформируемого подслоя (7) при удалении от адгезионного слоя (2) к промежуточному (8) эмалевому (9) слоям. Для обеспечения целостности покрытия при образовании трещин в защищаемой железобетонной конструкции, напряжения на границе эластичного подслоя (7) и промежуточного (8) подслоя покрытия не должны превышать прочности последнего на разрыв. Это свойство было положено в основу получения трещиностойких покрытий с эластичным подслоем.

При выполнении противокоррозионной защиты лакокрасочными покрытиями бетона конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия жидких агрессивных сред, в основном преследуется одна цель: предотвратить диффузию последних через защитное покрытие и уменьшить их разрушительное действие на конструкции.

Известно, что проницаемость лакокрасочных покрытий зависит от ряда факторов, среди которых наиболее существенное влияние оказывают: свойства пленкообразующего полимера, его структура, строение и расположение молекул, наличие полярных и ионогенных групп в полимерной макромолекуле, вид и форма частиц пигmenta, степень пигментирования и толщина самого полимерного покрытия [5].

Большой практический интерес представляет определение оптимального соотношения между составляющими компонентами покрытий, их влияние на набухаемость, проницаемость и других свойств последних. Зная определенные закономерности, присущие этой связи, можно создать покрытия с заданными эксплуатационными характеристиками и с наибольшей достоверностью прогнозировать их защитные свойства.

С этой целью было изучено влияние добавок катионита КУ 2-8ЧС в  $H^+$  и

в  $\text{Ca}^{2+}$  формах на набухаемость ( $W_{\text{ног}}$ , % мас.), влагопроницаемость  $\{P_v, \text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{Па})\}$  и кислотопроницаемость  $\{P_k, \text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{Па})\}$  покрытий на основе эпоксидной смолы ЭД-20.

Изучение набухаемости лакокрасочных эпоксидных покрытий в воде (рис. 6) показало, что покрытия, содержащие катионит КУ 2-8ЧС в  $\text{H}^+$  и в  $\text{Ca}^{2+}$  формах (3 и 4), обладают наибольшей набухаемостью по сравнению с лаковым и эмалевым покрытиями (1 и 2) и это вызвано значительным набуханием самого катионита.

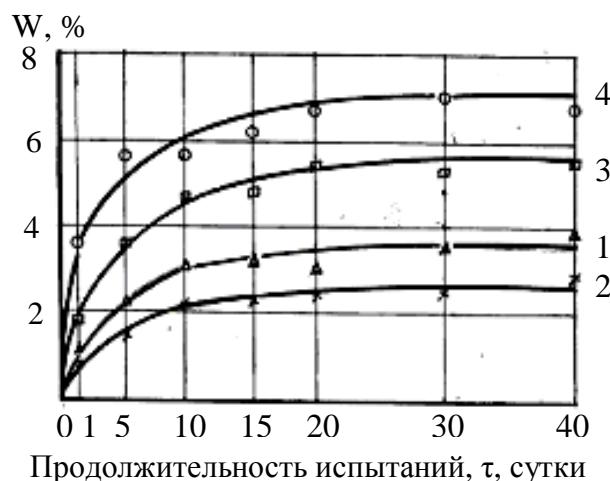


Рис. 6. Изучение набухаемости лакокрасочных эпоксидных покрытий в воде:  
1 – лаковое; 2 – эмалевое; 3 – с содержанием катионита КУ 2-8ЧС в  $\text{H}^+$  форме;  
4 – с содержанием катионита КУ 2-8ЧС в  $\text{Ca}^{2+}$  форме

Сравнение хода кривых влагопроницаемости (рис. 7) с ходом кривых набухаемости (рис. 6) тех же покрытий во времени показывает, что изменение влагопроницаемости во времени представляет производную функции (3), описывающей зависимость набухания от времени, что может быть выражено уравнением:

$$[\text{dm}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{d}\tau] \cdot \tau = P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot K, \quad (3)$$

где  $m$  – набухаемость, % масс.;  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  – коэффициент влагопроницаемости,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{Па})$ ;  $\tau$  – продолжительность испытаний, сут.;  $K$  – поправочный коэффициент.

Очевидно, что по мере набухания покрытий (рис. 6) происходит уплотнение их структуры и снижение, как следствие, проникновения влаги через

них (рис. 7). Это связано с гомогенизацией и уплотнением структуры полимера, так и с образованием водных ассоциатов, препятствующих продвижению мономерной воды.

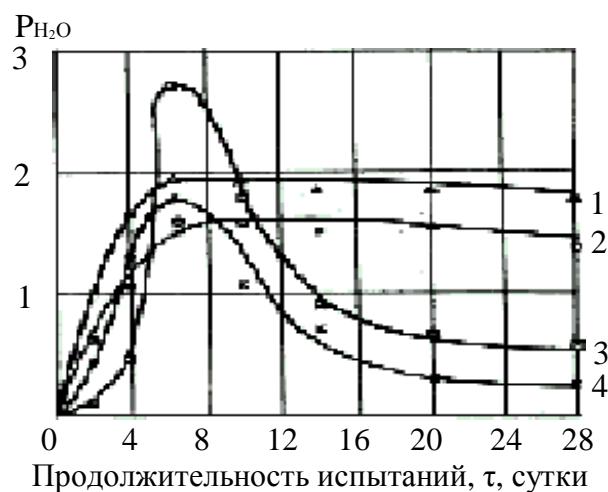


Рис. 7. Изучение влагопроницаемости лакокрасочных эпоксидных покрытий в воде:

- 1 – лаковое; 2 – эмалевое; 3 – с содержанием катионита КУ 2-8ЧС в  $H^+$  форме;
- 4 – с содержанием катионита КУ 2-8ЧС в  $Ca^{2+}$  форме

Особенно заметно это явление в пленках 3 и 4, которые, как известно, способны удерживать у ионогенных групп значительное количество воды в виде гидратной оболочки.

Исследование методом наложенного напряжения проницаемости уксусной кислоты  $CH_3COOH$  (рис. 8) через покрытия того же состава показали, что коэффициент кислотопроницаемости ( $P_k$ ) покрытия 1 равен  $0,66 \cdot 10^5$  кг/(м·с·Па), а покрытия 2 практически равен нулю. Значения  $P_k$  для покрытий 3 и 4 имеют отрицательные значения.

Дальнейшие исследования показали, что в покрытиях 3 и 4 возникает положительное электрическое поле, обусловленное наличием катионита КУ 2-8ЧС в  $H^+$  или  $Ca^{2+}$  формах. Положительное электрическое поле направлено против движения  $H^+$  ионов кислот, что затрудняет их диффузию через такие покрытия. Диффундирующую часть кислот через покрытия, содержащие катионит КУ 2-8ЧС в  $Ca^{2+}$  форме, нейтрализуется в результате обмена  $H^+$  катионов кислот на  $Ca^{2+}$  катионы с образованием труднорастворимых кальциевых солей не коррозионноопасных для бетона.

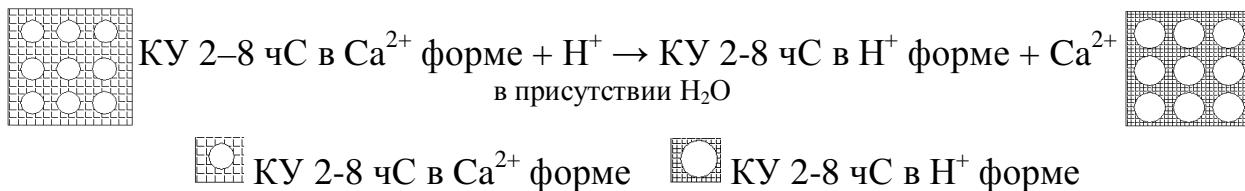
Таким образом, полимерные покрытия, содержащие в своих составах положительно заряженные компоненты, способствуют снижению или полностью предотвращают диффузию через них кислот.



Рис. 8. Исследование проницаемости уксусной кислоты  $\text{CH}_3\text{COOH}$ :

1 – лаковая пленка; 2 – эмалевая; 3 – лаковая с содержанием катионита КУ 2-8 чС в  $\text{H}^+$  форме; 4 – лаковая с содержанием катионита КУ 2-8 чС в  $\text{Ca}^{2+}$  форме.

Снижение проницаемости кислот через полимерные покрытия имеет место благодаря содержанию в промежуточный слой катионита КУ 2-8 чС в  $\text{Ca}^{2+}$  форме. Растворы кислот диффундируют через лакокрасочные покрытия в диссоциированном виде и при достижении фронтом диффузии поверхности катионита КУ 2-8 чС в  $\text{Ca}^{2+}$  форме происходит обмен ионов  $\text{Ca}^{2+}$  на ионы  $\text{H}^+$  с выделением ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в свободном виде согласно реакции:



Катионит КУ 2-8 чС обладает высокой набухаемостью и при его контакте с жидкими средами он значительно увеличивается в объеме уплотняя полимерную составляющую промежуточного подслоя покрытия. Таким образом, кроме ионного обмена снижение проницаемости имеет место и за счет уплотнения полимерного составляющего покрытия. Химическая и механическая стойкость полимерных покрытий, их цвет и внешний вид, а при необходимости и санитарно-гигиенические свойства обеспечиваются эмалевым слоем. Исходя из этих теоретических предпосылок были разработаны и внедрены лакокрасочные покрытия для защиты бетона конструкций, эксплуатируемых в различных агрессивных средах, в т.ч. и в условиях предприятий по переработке плодов и овощей.

## **Выводы.**

**1.** Адгезия лакокрасочных покрытий для изоляции и защиты железобетонных конструкций зависит от влажности, пористости, прочности поверхностного слоя бетона и его гидрофильтрности по отношению к грунтовочному материалу, а также от вязкости и особенностей материала полимерного грунта и его возможности реагировать с компонентами бетона с образованием прочных химических соединений.

**2.** При образовании и раскрытии в пределах допустимых значений трещин в конструкциях из железобетона, повышение трещиностойкости лакокрасочных покрытий возможно включением в их систему промежуточного подслоя из эластичного материала.

**3.** Снижение водо- и кислотопроницаемости полимерных лакокрасочных покрытий возможно введением в их состав катионита КУ 2-8 чС, который набухает в воде и увеличиваясь в объеме уплотняет покрытие, уменьшая его проницаемость. В  $\text{Ca}^{2+}$  форме катионит КУ 2-8 чС обменивает ионы  $\text{Ca}^{2+}$  на  $\text{H}^+$  ионы, нейтрализуя, таким образом, кислоты и уменьшая их отрицательное воздействие на бетон.

**4.** Положительное электрическое поле полимерных покрытий, обусловленное наличием катионита КУ 2-8чС в  $\text{Ca}^{2+}$  форме, направлено против движения  $\text{H}^+$  ионов кислот, что затрудняет их диффузию через такие покрытия.

**Список литературы.** 1. Степанова В.Ф. Выбор критериев оценки и основных показателей качества антикоррозионных покрытий бетона / В.Ф. Степанова, С.Е. Соколова, А.Л. Полушкин // Строительные материалы. – 2000. – № 10. – С. 12 – 13. 2. Руссу И.В. Зависимость адгезии полимерных покрытий от свойств лакокрасочных материалов и особенностей бетонного субстрата / И.В. Руссу // Строительные материалы. – 2004. – № 6. – С. 42 – 43. 3. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84. – М., 1985. – 79 с. 4. Черников Г.П. Опыт применения трещиностойких защитных покрытий на основе хлорсульфированного полиэтилена / Г.П. Черников // Противокоррозионные работы в строительстве. – 1982. – Вып. 4. – С. 2 – 4. 5. Заиков Г.Е. Диффузия электролитов в полимерах / Г.Е. Заиков, А.Л. Иорданский, В.С. Маркин. – М.: Химия, 1984. – 240 с.

Поступила в редакцию 26.07.11

**И.Ю. ШУТЕЕВА**, научн. сотрудн., НТУ «ХПИ»,  
**Г.Д. СЕМЧЕНКО**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,  
**О.Н. БОРИСЕНКО**, канд. техн. наук, мл. научн. сотрудник., НТУ «ХПИ»,

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ САМОТВЕРДЕЮЩИХ КОРУНДОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАЩИТЫ ГРАФИТА ОТ ОКИСЛЕНИЯ**

В роботі представлено результати дослідження стійкості корундових покріттів на золь-гель зв'язуючому в умовах високотемпературних циклічних іспитів. Підтверджено переваги створення проміжного (бар'єрного) шару покриття, армованого наночастками карбіду кремнію та нитковидними кристалами мулліту.

В работе представлены результаты исследования стойкости корундовых покрытий на золь-гель связующем к высокотемпературным циклическим испытаниям. Подтверждено преимущество создания промежуточного (барьерного) слоя покрытия, армированного наночастицами карбида кремния и нитевидными кристаллами муллита.

The results of research strength corundum coatings on sol-gel binder for high-temperature cyclic tests. Confirmed the advantage of an intermediate (barrier) layer coating, reinforced with nanoparticles of silicon carbide whiskers and mullite.

Для новой техники и современных технологий в разных отраслях промышленности в связи с интенсификацией процессов и режимов работы агрегатов и установок все больше проявляется необходимость в использовании графитовых и углеграфитовых изделий, которые могут служить при более высоких температурах, чем оксидные материалы. Однако основной недостаток углеродсодержащих материалов состоит в их окислении при температурах выше 600 °C. Существуют эффективные покрытия для защиты графита от окисления до 1500 °C. Для повышения температуры службы графитовых материалов и их стойкости к окислению в настоящее время стоит задача создания способов их защиты при температурах выше 1650 °C. Поэтому интерес вызывает разработка стойких покрытий для высокотемпературной защиты графита от окисления, в том числе на основе оксидов. Использование оксидного наполнителя и золь-гель связующих при создании защитных покрытий, как показано [1 – 10], является перспективным для создания самотвердею-

щих корундовых покрытий на золь-гель связующих, являющихся источником прекурсора компонентов для синтеза в покрытии частиц  $\beta$ -SiC, способствующих самоармированию и уплотнению промежуточного слоя, предохраняющего графитовую подложку от окисления и от взаимодействия углерода подложки с компонентами покрытия.

Целью данной работы явилось исследование стойкости корундовых покрытий при высоких температурах испытаний, выяснение причины высокой стойкости разработанных корундовых покрытий.

Образцы из графита с нанесенными самотвердеющими корундовыми покрытиями высушивали при комнатной температуре в течение 1 – 2 суток, а затем обжигали по разработанному режиму при максимальной температуре 1300 °С в аргоне в течение 1 часа. Были определены прочность сцепления покрытий с графитом, а также ТКЛР и термостабильность при термоциклировании (таблица).

Таблица  
Характеристика свойств покрытий

Показатели свойств	Покрытия			
	C-3	C ¾	C-A	C-B
Прочность сцепления на разрыв, МПа	57,1	63,2	61,3	59,1
ТКЛР покрытий, $\times 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	5,83	6,78	6,12	6,30
Термостабильность, % сколов 1300 – 20 °С, с выдержкой 1 час при 1300 °С и охлаждением образцов струей холодного воздуха в течение 10 минут):				
После 1 цикла:				
– от поверхности покрытия	0	0	0	0
– от графитовой подложки	0	0	0	0
После 3 цикла:				
– от поверхности покрытия	0	1	0	0
– от графитовой подложки	0	0	0	0
После 5 цикла:				
– от поверхности покрытия	2	5	3	2
– от графитовой подложки	0	0	0	0

Как видно из табл. 1, у разработанных покрытий процент сколов на поверхности корундового покрытия значительно выше, чем процент сколов от графитовой подложки при испытаниях покрытий на термостойкость других составов.

Установлено, что промежуточный слой С-3 между слоем покрытия и графитовой подложкой оказывает существенное влияние не только на защиту графита от окисления, но и на сцепление графитовой подложки с корундовым покрытием. Это объясняется тем, что ТКЛР этого слоя приближается к ТКЛР графитовой подложки благодаря синтезу в промежуточном слое наноразмерного  $\beta$ -SiC и муллита. Причем установлено, что количество  $\beta$ -SiC возрастает с увеличением количества модифицирующей добавки алcoxида кремния, используемой для модификации поверхности порошка корунда. С увеличением количества частиц  $\beta$ -SiC и муллита ТКЛР промежуточного слоя снижается и становится ближе к ТКЛР графитовой подложки. Все это способствует повышению прочности сцепления корундового покрытия с графитовой подложкой и увеличивает эксплуатационные характеристики графитовой конструкции с покрытием.

Прочность сцепления покрытия обеспечивается за счет самоармирования матрицы и наночастицами  $\beta$ -SiC и нитевидными кристаллами муллита промежуточного слоя, проникновения нитевидных кристаллов в поры и дефекты структуры графитовой подложки.

Во всех исследованных покрытиях и других композициях на основе этилсиликатной связки и  $Al_2O_3$  присутствует муллит. Это объясняется химическим взаимодействием  $Al_2O_3$  с аморфным  $SiO_2$  гелем. Снижение ТКЛР корундовых покрытий на этилсиликатных связках объясняется именно этим взаимодействием. ТКЛР муллита равен  $5,3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Частично этим взаимодействием объясняется также достаточно интенсивное снижение ТКЛР покрытий в присутствии  $B_2O_3$ , так как этот оксид способствует интенсификации кристаллизации муллита. Количество муллита в покрытиях на этилсиликатной связке достигает 12 – 18 %, с добавкой  $B_2O_3$  – 25 %.

Достаточно высокое значение ТКЛР покрытий с синтезированными наночастицами  $\beta$ -SiC можно объяснить синтезом небольшого количества добавки  $\beta$ -SiC (до 5 – 7 %), а также, возможно, частичным окислением наноразмерного  $\beta$ -SiC в процессе высокотемпературных испытаний. Значение ТКЛР SiC  $4,71 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ .

На основе полученных результатов в последующих исследованиях и при использовании покрытий для защиты графитовых изделий в службе использовали в качестве промежуточного слоя составы обмазок С-3.

Исследование термостабильности разработанных покрытий проводили в условиях нагревания до 1300 °С и резком охлаждении нагретых графито-

вых образцов с нанесенным покрытием в потоке холодного воздуха. При термоциклировании наблюдали за отслоением слоев корундового покрытия и за появлением отслоений покрытия от графитовой подложки.

Как видно, при термоциклировании процент сколов на поверхности корундовых покрытий значительно выше, чем процент сколов корундового покрытия от графитовой подложки. Прочность сцепления покрытий разного состава с подложкой составляет около 60 МПа. При этом прочность сцепления разработанных покрытий вдвое выше, чем у других известных покрытий. Барьерный слой между покрытием и графитовой подложкой оказывает существенное влияние на сцепление графитовой подложки с покрытием: процент сколов покрытия от графитовой подложки при термоударах значительно меньше, чем от поверхности корундового покрытия. Термоустойчивость корундового покрытия увеличивается благодаря тому, что ТКЛР промежуточного слоя использованного состава С-3 приближается к ТКЛР графитовой подложки ближе, чем ТКЛР покрытий слоев других составов. Это объясняется тем, что промежуточный слой корундового покрытия насыщается наночастицами  $\beta$ -SiC и кристаллами муллита, ТКЛР которых ниже, чем ТКЛР корунда и ближе к этому показателю графита. Степень армирования промежуточного слоя наночастицами SiC, муллитом и нитевидными кристаллами муллита способствует повышению прочности сцепления промежуточного слоя с графитовой подложкой, уплотнению структуры промежуточного слоя и, следовательно, улучшению эксплуатационных характеристик покрытия, повышению его термостойкости.

Уплотнению промежуточного слоя, улучшению проникновения покрытия в дефекты графитовой подложки и их залечиванию, интенсификации муллитизации матрицы корундового покрытия способствует насыщение двух слоев нанесенного промежуточного слоя золь-гель композицией, при термообработке которой образуется аморфный  $\text{SiO}_2$ , способствующий интенсификации спекания корундовой массы.

Для выявления зависимости прочности сцепления покрытия с графитовой подложкой были изучены структура и фазовый состав промежуточного слоя до и после службы, а также фазовый состав сформировавшихся в процессе службы зон: промежуточный слой, основной слой покрытия и поверхностный слой (оплавленный).

Анализ дифрактограмм показывает [3, 8, 10, 11], что промежуточный (барьерный) слой после испытаний состоит из корунда, муллита и  $\beta$ -SiC. На

дифрактограмме заметен только один пик углерода. Интенсивность максимумов, соответствующих  $\beta$ -SiC, большая.

Основной слой покрытия состава  $C^{3/4}$  состоит также из корунда, муллита и  $\beta$ -SiC, но появляются пики, характерные для Si и углерода, интенсивность которых незначительна. Присутствие небольшого количества Si можно объяснить восстановлением остатков кремнезема  $SiO_2$  (в виде кварца) при температуре 1750 °С. Наблюдается увеличение пиков углерода, что, вероятно, свидетельствует о начале проникновения углерода графитового тела в слой покрытия при такой высокой температуре.

В оплавленной части покрытия  $C^{3/4}$  после испытания при 1750 °С часть  $SiO_2$  превращается в стишовит, что и объясняет оплавление покрытия и появление прозрачных участков на его поверхности.

После испытаний силицированных графитов с корундовым покрытием толщина последнего утончается до 180 – 200 мкм и местами появляются «мушки» – места будущего прогара. Но после испытаний при температуре 1750 °С покрытие остается целым, прогары на наблюдаются.

Использование электрокорунда, модифицированного добавкой элементоорганического вещества (1 – 3 % ТЭОС), и золь – гель связующей композиции в качестве связующего с одновременным использованием пропитки в золе графитового тела с затвердевшим и высушенным на воздухе покрытием этого состава способствует увеличению адгезии покрытия в микродефекты графитовой подложки, повышению степени закристаллизованности покрытий за счет синтеза муллита и армирования образовавшегося промежуточного слоя наночастицами  $\beta$ -SiC. Образовавшиеся кристаллы муллита в виде частиц размером 1 – 3 мкм и нитевидных кристаллов длиной до 3 – 5 мкм пронизывают образовавшуюся аморфную стеклофазу, которая проникает на глубину до 150 мкм в дефекты графитовой подложки. Стеклосвязка прочно склеивает нанесенное покрытие с графитовой подложкой, а армирование стеклосвязки нитевидными кристаллами увеличивает прочность адгезии. Синтезированные частицы  $\beta$ -SiC в результате механоактивации в процессе измельчения электрокорунда с добавкой ТЭОС и термообработки золь-гель связующей композиции, являются антиоксидантами и поэтому препятствуют проникновению в промежуточный слой покрытия углерода из графитового тела, который защищает его от окисления, предохраняя графит под покрытием от выгорания. Все это также способствует увеличению прочности сцепления нанесенных покрытий с графитовой подложкой по мере их закристалли-

зованности, повышению плотности и приближению значений ТКЛР барьера-ного слоя к ТКЛР графитовой подложки.

При термообработке в промежуточном слое образуются кристаллические фазы муллита и  $\beta$ -SiC. Для синтеза  $\beta$ -SiC используются только компоненты органо-неорганического комплекса  $(-\text{CH}_3)_n(\text{SiO}_2)_n$ , углерод графитовой подложки не участвует в синтезе карбида кремния барьера-ного слоя, что определяет прочность прилегания корундового покрытия к подложке и повышенную прочность сцепления.

Таким образом, наличие зародышей и наночастиц  $\beta$ -SiC в модифицированном алкоксидом кремния корундовом наполнителе покрытия и образование органо-неорганических комплексов  $(-\text{CH}_3)_n(\text{SiO}_2)_n$  [12] при термообработке гелей, которые являются источником углерода и монооксида кремния для дальнейшего синтеза  $\beta$ -SiC в процессе термообработки до службы, способствует армированию наночастицами  $\beta$ -SiC не только промежуточного слоя, но и последующих слоев основной части покрытия, в которых использована добавка  $\text{B}_2\text{O}_3$ , введение которой интенсифицирует синтез  $\beta$ -SiC, что приводит к повышенной стойкости самого покрытия и повышению стойкости к окислению графитовых изделий, защищенных этим покрытием.

**Список литературы:** 1. Семченко Г.Д. Исследование возможности использования корундо- и цирконийсодержащих обмазок для защиты от окисления графитовых изделий / [Г.Д. Семченко, И.Ю. Шутеева, О.А. Вильк и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». – 2005. – № 51. – С. 32 – 37. 2. Семченко Г.Д. Защита графита и графитсодержащих материалов от окисления / [Г.Д. Семченко, О.Н. Борисенко, И.Ю. Шутеева и др.] // Новые огнеупоры. – 2005. – № 7. – С. 25 – 33. 3. Семченко Г.Д. Теоретические и технологические особенности создания плотных покрытий для защиты графитовых изделий от окисления / [Г.Д. Семченко, И.Ю. Шутеева, М.А. Кущенко и др.] // XX Всеросийского совещания по температуростойчивым функциональным покрытиям: 27 – 28 ноября 2007 г.: тез. докл. – С-Пб.: Лема, 2007. – С. 66 – 67. 4. Семченко Г.Д. Дисперсионное упрочнение и самоармирование – залог повышения качества композиционных материалов и огнеупоров / [Г.Д. Семченко, И.Н. Опрышко, О.Н. Борисенко и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2007. – № 9. – С. 8 – 11. 5. Шутеева И.Ю. Влияние термоокислительных процессов на прочностные свойства графитовых изделий, пропитанных золь-гель композициями / [И.Ю. Шутеева, Л.В. Руденко, Г.Д. Семченко и др.] // Вісник НТУ«ХПІ». – 2008. – № 39. – С. 170 – 176. 6. Семченко Г.Д. Создание нанореакторов для синтеза наноразмерных бескислородных соединений / [Г.Д. Семченко, И.Н. Опрышко, О.Н. Борисенко и др.] // Вісник НТУ«ХПІ». – 2008. – № 38. – С. 162 – 166. 7. Семченко Г.Д. Возможности нанохимии для создания КМ с повышенной трещиностойкостью и стойкостью к окислению / [Г.Д. Семченко, И.Н. Шутеева, И.Н. Опрышко и др.] // XVII укр. конф. з неорганічної хімії за участю закордонних вчених, присвячена 90-річчю заснування НАНУ: 15 – 19 вересня 2008 р.: тези допов. – Львів: Видавничий центр ЛГУ ім. І. Франка, 2008. – С. 49. 8. Семченко Г.Д. Создание  $\beta$ -SiC в промежуточном слое корундовых покрытий на золь-гель связующем для защиты графитовых изделий от окисления / Г.Д. Семченко, И.Ю. Шутеева, М.А. Кущенко //

Высокотемпературные материалы и технологии в ХХІ веке: науч.-техн. конф., 12-13 мая 2008 г.: тезисы докл. – Томск. – <http://chemstud.ghtd.tpu.ru>. **9.** Семченко Г.Д. Термодинамическое исследование возможности низкотемпературного синтеза SiC в системе Si-O<sub>2</sub>-C / [Г.Д. Семченко, И.Ю. Шутеева, М.А. Кущенко и др.] // Современные проблемы термодинамики и теплофизики: всерос. конф., 1 – 3 декабря 2009 г.: тезисы докл. – Новосибирск, 2009. – С. 187. **10.** Шутеева И.Ю. Исследование изменения фазового состава при формировании покрытий по графиту в процессе нагревания в аргоне / [И.Ю. Шутеева, М.И. Рыщенко, Г.Д. Семченко и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 45. – С. 178 – 183. **11.** Семченко Г.Д. Самотвердеющие покрытия для защиты от окисления графитовых изделий / Г.Д. Семченко // Огнеупоры и техническая керамика. – 1997. – № 5. – С. 19 – 23. **12.** Семченко Г.Д. Современные процессы в технологиях конструкционной керамики / Г.Д. Семченко. – Харьков: Гелиос, 2011. – 276 с.

Поступила в редакцию 26.07.11

УДК 691.175:519

**C. КОВАЛЬ**, докт. техн. наук, проф.,

Варминско-Мазурский Университет, Ольштын, Польша

**M. СИТАРСКИ**, магистр-инженер,

Варминско-Мазурский Университет, Ольштын, Польша

**H. АБИД**, аспирант, ОГАСА, Одесса

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБАВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА**

З використанням спеціальних технологічних тестів, статистичного моделювання і компромісної оптимізації досліджена ефективність добавок для бетону, що самоущільнюється.

С использованием специальных технологических тестов, статистического моделирования и компромиссной оптимизации исследована эффективность добавок для самоуплотняющегося бетона.

With the using of the special technological tests, statistical modeling and compromise optimization researched efficiency of additions for the self-compacting concrete.

Самоуплотняющийся бетон (*Self-Compacting Concrete, SCC*) – бетон из смесей, способных уплотняться без вибрации с вытеснением воздуха, полностью заполняющих форму в густоармированных конструкциях без сегрегации – является «прорывом» в технологии бетона [1]. Уникальные свойства таких бетонов достигаются за счет введения «гиперсуперпластификаторов» и других полифункциональных добавок новых поколений, многофракционных

дисперсных наполнителей и заполнителей.

Разработка многокомпонентных бетонов типа *SCC* базируется на использовании новых эмпирических и математических подходах, в том числе вычислительных экспериментов на многофакторных моделях составов и свойств [1, 2].

С учетом высокой чувствительности бетонов *SCC* к колебаниям факторов рецептуры, оценку эффективности добавок целесообразно вести не на одном или нескольких составах бетона, а на некотором их множестве. Это позволяет, в частности, оценить возможность стабилизации свойств бетона, а также сокращения расхода дорогостоящих добавок.

Для решения таких рецептурно-технологических задач эффективны экспериментально-статистические модели (*ЭС-модели*), полученные на основании результатов оптимально планируемых экспериментов [3].

Верификационные тесты самоуплотняющихся смесей построены на оценке их реологических свойств – вязкости, текучести, однородности и др. [4]. Если смесь не отвечает какому-либо нормативному уровню, она переводится в более низкий класс или вообще не признается самоуплотняющейся.

В работе [2] определены составы с необходимым диаметром расплыва смеси («*Slump-flow test*») и малой степенью расслоения – параметрами, доступными для оценки в условиях заводских лабораторий.

Дальнейшие исследования на специальном оборудовании включали оценку вязкости по времени расплыва бетонной смеси и продолжительности истечения из воронки («*V-funnel-Test*»), а также способности к нивелированию и преодолению препятствий («*L-box Test*»). Последний параметр – отношение уровней бетонной смеси до ( $H_1$ ) и после ( $H_2$ ) прохождения сквозь «гребень» арматурных стержней заданного диаметра.

Ряд этих методик входит в европейские нормы EN 206-9 на бетон, другие – рекомендуются специальными документами (рис. 1) [4]. Вышеуказанные параметры служили критериями для оценки эффективности добавок в бетоны типа *SCC*. Реализован план эксперимента, в котором изменялись концентрации поликарбоксилатного суперпластификатора на уровнях  $SP = X_1 = 1,4 \pm 0,4\%$  от массы цемента и золы уноса («*popiół lot-pol.*») в диапазоне  $Pl = X_2 = 30 \pm 10\%$ . Опыты (табл. 1) проведены с практически равноподвижными смесями – диаметр расплыва конуса  $D = 70 \text{ см} \pm 2 \text{ см}$ , что достигалось за счет корректировки расхода воды.

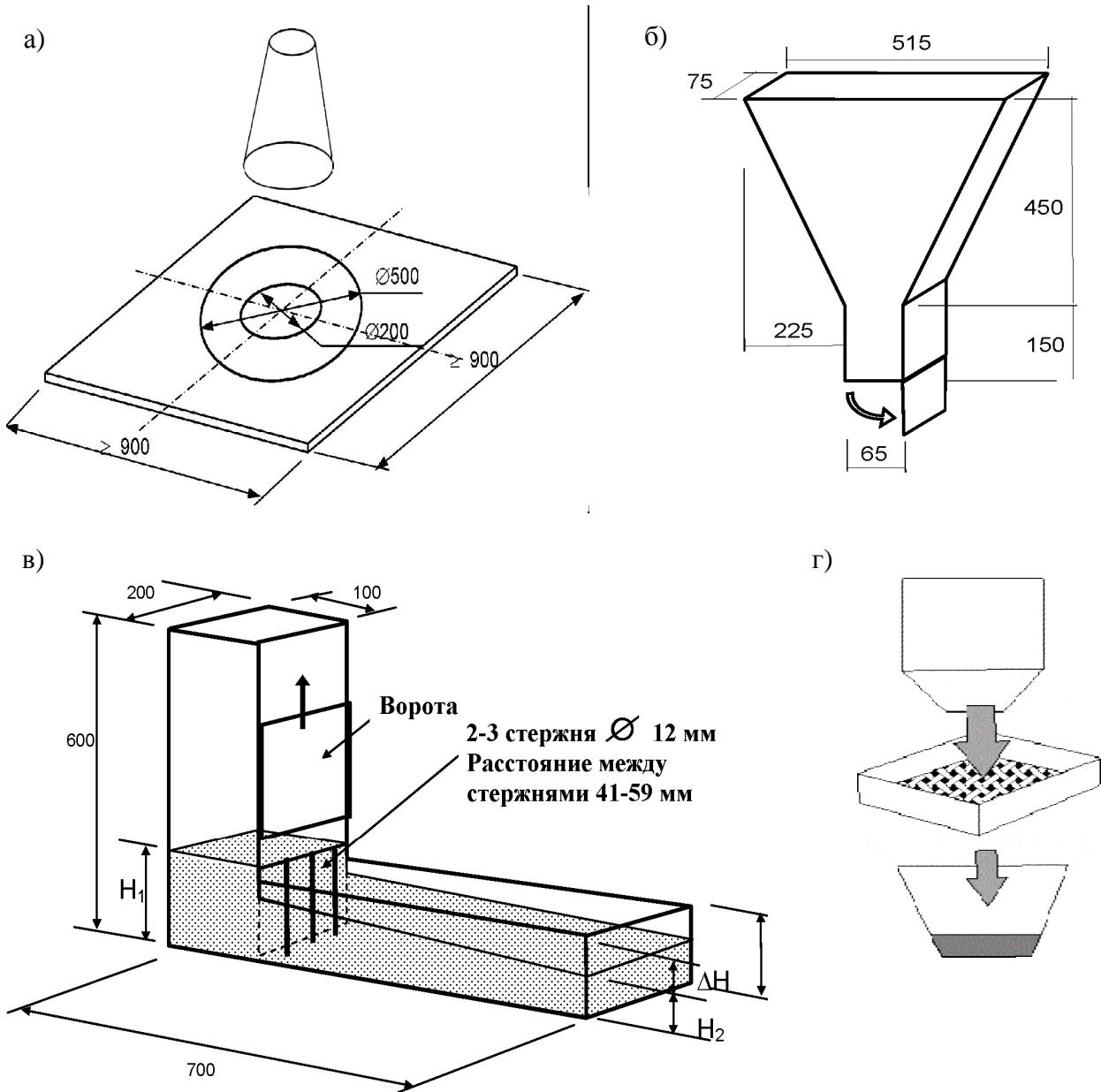


Рис. 1. Схемы оборудования для оценки качества смеси, рекомендуемого «European Guidelines for Self-Compacting Concrete» [4]

Анализ результатов экспериментов (таблица) показывает, что составы № 1 и № 4 не удовлетворяют требованиям по одному из критериев. В этом случае они могут рассматриваться как «квазисамоуплотняющиеся» (*Almost Self-Compacting Concrete, ASCC*), для которых допускается применение вибрации [5].

Для описания влияния добавок использовались приведенные полиномы вида:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{112}x_1^2x_2 + b_{122}x_1x_2^2 + b_1x_2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

где  $x_1, x_2$  – нормализованные переменные значения дозировок SP и золы уноса.

Модель (1) описывает при заданном уровне риска  $\alpha$  и ошибке эксперимента  $s_\alpha$  индивидуальное влияние факторов  $x_i$ , а также взаимодействия между ними с учетом возможного синергизма за счет включения эффектов типа  $b_{ij}x_i^2x_j$ .

Таблица  
Результаты испытаний и классы бетонных смесей

№	План		Дозировки добавок		Оценка консистенции смеси	Оценка пластической вязкость бетонной смеси				Оценка самонивелирования		
	$x_1$	$x_2$	CП, %	Pl, %		D, см	Класс	$T_{50}$ , с	Класс	$T_v$ , с	Класс	$H_2/H_1$
1	–	–	1,0	20	72	SF2	2,5	VS2	7,0	VF1	0,65	–
2	–	0	1,0	30	69	SF2	4,0	VS1	12,0	VF2	0,91	PA2
3	–	+	1,0	40	71	SF2	4,0	VS1	24,0	VF2	1,0	PA2
4	0	–	1,4	20	70	SF2	2,5	VS2	10,0	VF2	0,76	–
5	0	0	1,4	30	72	SF2	6,0	VS1	15,0	VF2	0,83	PA2
6	0	+	1,4	40	69	SF2	10,0	VS1	50,0	VF2	0,91	PA2
7	+	–	1,8	20	72	SF2	2,0	VS2	16,0	VF2	0,82	PA2
8	+	0	1,8	30	70	SF2	4,0	VS1	11,0	VF2	0,91	PA2
9	+	+	1,8	40	71	SF2	5,0	VS1	30,0	VF2	0,94	PA2

Изменение водосодержания  $W$  (%) смеси при варьировании количеством добавок описывает зависимость (2) со всеми значимыми коэффициентами:

$$W = 179,9 - 2,5x_1 + 2,7x_1^2 - 0,3x_1x_2 + 0,3x_1^2x_2 - 0,3x_1x_2^2 - 5,0x_2 + 0,2x_2^2 \quad \alpha = 0,2; \\ [s_\alpha = 0,1 \text{ дм}^3/\text{м}^3] \quad (2)$$

Из анализа модели (2) на рис. 2а следует, что одновременное увеличение дозировок добавок (в границах эксперимента) положительно сказывается на водоредуцировании бетонных смесей. Однако, чувствительность параметра  $W$  к изменению дозировок добавок в смесях SCC значительно меньше, чем в обычных.

«Марочная» прочность  $R_{28}$  (МПа), при высоком содержании золы может возрастать не пропорционально уменьшению водоцементного отношения, что следует из анализа представленной на рис. 2б зависимости (3):

$$R_{28} = 48,7 + 4,1x_1 \pm 0x_1^2 - 4,2x_1x_2 + 6,5x_1^2x_2 - 1,7x_1x_2^2 + 3,2x_2 - 3,2x_2^2, \\ [\alpha = 0,2; s_9 = 0,4 \text{ МПа}]. \quad (3)$$

Показатель  $R_{28}$  изменяется более чем в 1,5 раза при переходе от низких к высоким концентрациям добавок (что свидетельствует о его большей чувствительности) и достигает максимума  $R_{28} = 54,3$  МПа при  $SP = 1,8\%$  и  $PI = 35\%$ .

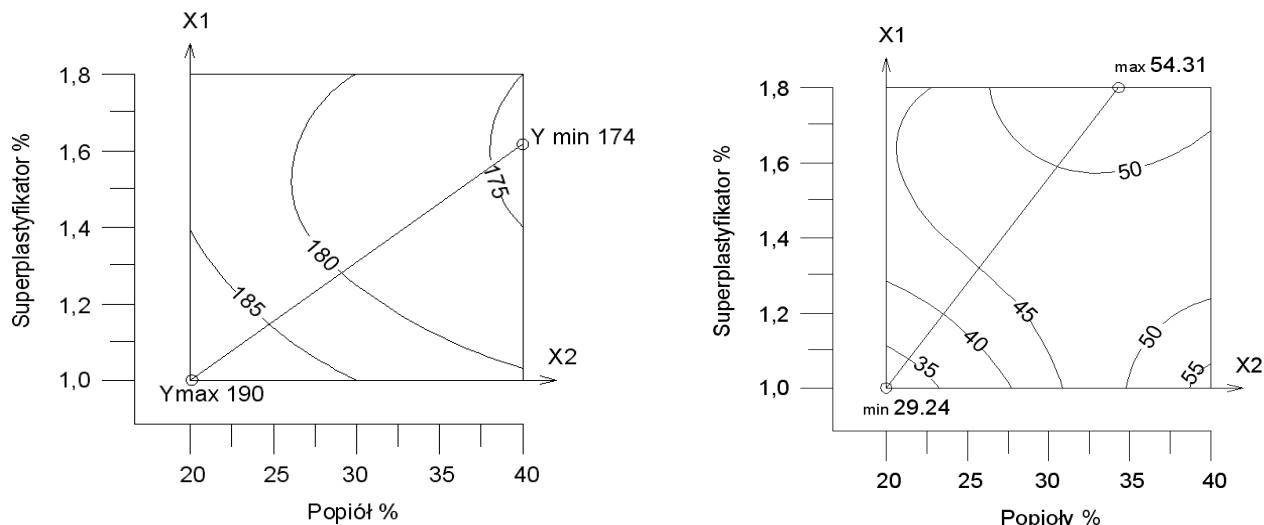


Рис. 2. Влияние добавок на водосодержание бетонной смеси  $W, \%$ , (а) и «марочную» прочность  $R_{28}$  (МПа) бетона в возрасте 28 сут (б)

Время  $T_{50}$  (в секундах) расплыва бетонной смеси до диаметра 50 см, характеризующее скорость заполнения смесью опалубки, зависит, в первую очередь, от содержания золы уноса, что следует из анализа модели (4):

$$T_{50} = 6,4 \pm 0x_1 - 2,6x_1^2 + 0,4x_1x_2 - 2,6x_1^2x_2 \pm 0x_1x_2^2 + 3,8x_2 - 0,3x_2^2, \\ [\alpha = 0,2; s_9 = 0,2 \text{ с}] \quad (4)$$

Увеличение количества золы влияет на повышение времени расплыва бетонной смеси. В то же время суперпластификатор с позиций сокращения этого времени эффективен лишь в концентрациях 1,0.. 1,2 % или 1,6...1,8 % (рис. 3.а). Влияние добавок на время (в секундах) истечения бетонной смеси из воронки V-funnel описывает зависимость  $V_f$ :

$$T_v = 18,2 \pm 0x_1 - 8,3x_1^2 \pm 0x_1x_2 - 12,3x_1^2x_2 + 3,8x_1x_2^2 + 20,0x_2 + 10,2x_2^2, \\ [\alpha = 0,2; s_9 = 1,8 \text{ с}]. \quad (5)$$

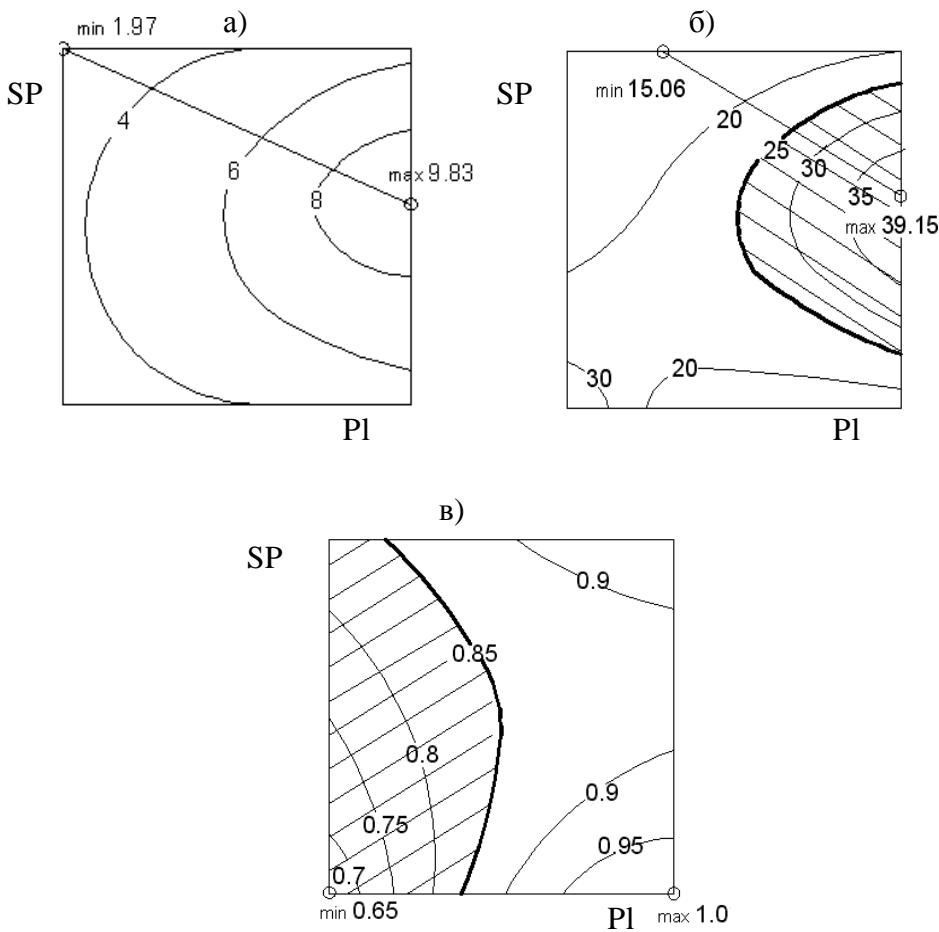


Рис. 3. Влияние добавок на время расплыва  $T_{50}$  (а) и истечения  $T_v$  (б)  
бетонной смеси, а также показатель самонивелирования  $H_2/H_1$  (в)  
(выделены области, не удовлетворяющие требованиям к SCC)

Увеличение количества золы приводит к увеличению времени  $T_v$  истечения в 1,3...1,5 раза. Суперпластификатор в зоне малого содержания золы уноса максимально понижает вязкость, судя по сокращению времени  $T_v$ .

Влияние добавок на параметр  $H_2/H_1$ , характеризующий способность бетонной смеси к самонивелированию, описывает зависимость вида:

$$H_2/H_1 = 0,86 \pm 0x_1 + 0,04x_1^2 - 0,06x_1x_2 + 0,04x_1^2x_2 + 0,03x_1x_2^2 + 0,08x_2 - 0,04x_2^2, \\ [\alpha = 0,2; s_3 = 0,02]. \quad (6)$$

Анализ графического отображения модели (6) показывает, что при повышении количества золы способность бетонной смеси к самонивелированию возрастает. Суперпластификатор улучшает эти свойства только при повышенном содержании наполнителя.

Поиск оптимальных решений велся на двухфакторных диаграммах при

совмещении изолиний уровней показателей качества.

Найдена компромиссная оптимальная область {A,B,C} дозировок добавок (рис. 4) в которой обеспечиваются классы SF2/VS1/VF2/PA2 самоуплотняющихся бетонных смесей при достижении высоких для этих классов уровней: консистенции ( $D = 70$  см), времени расплыва ( $T_{50} \leq 4\ldots6$  с) и истечения ( $T_v \leq 15\ldots20$  с), а также способности в нивелированию ( $H_2/H_1 = 0,85\ldots0,9$ ).

Прочность затвердевшего бетона составляет  $R_{28} = 50\ldots54$  МПа.

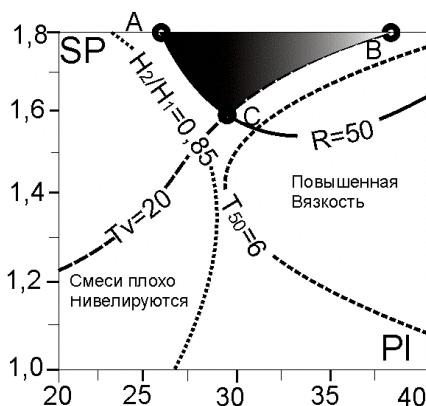


Рис. 4. Поиск области компромисса

Заданные уровни параметров качества SCC обеспечиваются дозировкой добавок  $SP = 1,6\ldots1,8\%$  и  $PI = 23\ldots36\%$ . Минимизация расхода поликарбоксилатного SP достигается при введении в бетонную смесь золы уноса в количестве 30 %.

**Список литературы.** 1. *Okamura H. Mix Design for Self-Compacting Concrete / H. Okamura, K. Ozawa // Concrete Library of JSCE.* – 1995. – № 25. – Р. 107 – 120. 2. Коваль С.В. Использование метода Монте-Карло для поиска составов самоуплотняющихся бетонов / С.В. Коваль, М. Циак, М. Ситарски // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 45. – С. 184 – 191. 3. Коваль С.В. Применение моделей в задачах оптимизации модифицированных бетонов / С.В. Коваль // Вісник ОДАБА. – № 12. – 2003. – С. 136 – 142. 4. The European Guidelines for Self Compacting Concrete” Specification, Production and Use, 2005. 5. Śliwiński J. Spostrzeżenia z praktycznego projektowania składu betonów samozagęszczalnych (SCC). IV Sympozjum Naukowo / J. Śliwiński, R. Czołgosz. // Techniczne. Reologia w technologii betonu. – Gliwice, 2002. – Р. 61 – 75.

Поступила в редакцию 25.07.11

**O.C. МИХАЙЛЮТА**, канд. техн. наук, наук. співроб.

**Є.В. АЛЕКСЄЄВ**, наук. співроб.

**В.В. КОЛЄДА**, канд. техн. наук, пров. наук. співроб.

**Т.О. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

**С.В. МАКУЩЕНКО**, студент, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпропетровськ

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ОДЕРЖАННЯ МЕТАКАОЛІНІВ ТА ЇХ ФАЗОВОГО СКЛАДУ НА ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ**

В статті приведені результати досліджень впливу фазового складу метакаолінів на їх пуцоланову активність. Розглянуто особливості фазових перетворень в процесі термічної обробки вторинних каолінів Пологівського, Мурзинського та Володимирського родовищ. Встановлена залежність термінів тужавлення цементного розчину та механічної міцності цементного каменю від температурних параметрів отримання метакаолінів.

В статье приведены результаты исследований влияния фазового состава метакаолинов на их пуцолановый активность. Рассмотрены особенности фазовых превращений в процессе термической обработки вторичных каолинов Пологовского, Мурзинского и Владимира месторождений. Установлена зависимость сроков схватывания цементного раствора и механической прочности цементного камня от температурных параметров получения метакаолинов.

In article are leaded the results of researches the effect of phase composition metakaolin's on their pucalnovi activity. The peculiarities of phase transformations in heating of kaolin's Pologovskyi, Murzinskyi and Vladimirskyi deposits are considered. The dependence of the setting time of cement mortar and mechanical properties of a cement stone from the temperature parameters of manufacture of metakaolin's.

Останнім часом у виробництві будівельних матеріалів все більшого застосування знаходить метакаолін – продукт дегідратації природних каолінів. У літературних джерелах [1, 2] відзначається висока активність метакаоліну в порівнянні з відомими пуцолановими добавками. Однак на практиці багато виробників та споживачів сухих будівельних сумішей, в яких метакаолін вже знайшов застосування, зіштовхуються із суперечливими результатами ефективності використання цього продукту.

Метою даної роботи явилося дослідити вплив фазового складу метакаолінів, отриманих в широкому температурному інтервалі із різних каолінів, на основні властивості шлакопортландцементу. В якості об'єктів досліджень

були обрані каоліни різних родовищ – Пологівського (Запорізька обл.), Мурзинського (Черкаська обл.) та Володимирського (Донецька обл.).

Для отримання продуктів дегідратації, нами була проведена послідовна термічна обробка вказаних каолінів в температурному інтервалі 500 – 900 °C з кроком в 50 °C [3]. На одержаних пробах за допомогою рентгенофазового та дифференційно-термічного аналізів вивчали динаміку зміни їх фазового складу. Схематично фазовий склад продуктів термообробки представлений в таблиці.

Таблиця

Фазовий склад продуктів дегідратації каолінів, отриманих при різних температурах\*

Темпер. прожарю- вання, °C	Найменування каоліну		
	Полозький	Мурзинський	Володимирський
до 500	каолініт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		
500	каолініт↓	каолініт↓	каолініт↓
550		метакаолініт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \uparrow$	метакаолініт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \uparrow$
600	метакаолініт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \uparrow$	Аморфізація структури	Аморфізація структури
650		активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2$	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2$
700	Аморфізація структури	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2$	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2$
750	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2$	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2 \downarrow$	Аморфізація структури
800	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2 \downarrow$	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2 \downarrow$	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2$
850	силіманіт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \uparrow$	силіманіт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \uparrow$	активні $\text{Al}_2\text{O}_3$ і $\text{SiO}_2 \downarrow$
900			силіманіт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \uparrow$
950			силіманіт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \uparrow$
вище 950	муліт первинний (980 °C) $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \uparrow$	муліт первинний (990 °C) $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \uparrow$	муліт первинний (990 °C) $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \uparrow$

\* – з метою виключення впливу кварцової складової зміну фазового складу досліджували після збагачення каолінів

Приведені дані свідчать, що в процесі термічної обробки дослідних каолінів, відбувається руйнування кристалічної решітки каолініту, що призводить до появи нових кристалічних фаз та аморфних утворень, причому для кожного каоліну ці процеси протікають при різних температурах.

У володимирському каоліні, починаючи з 650 °C, утворюється метакаолініт, кількість якого збільшується з підвищенням температури (рис. 1, 2). Аморфізація структури каолініту відбувається в межах температури ~ 800 °C,

а при температурі 850 °C вже можна ідентифікувати появу таких фаз, як кварц ( $\text{SiO}_2$ ), глинозем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) і силіманіт ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ), які при подальшому нагріванні приймають участь у формуванні кристалічної решітки первинного муліту [4], що підтверджується чітким, добре вираженим екзоефектом при 980 °C на термограмі каоліну (рис. 3).

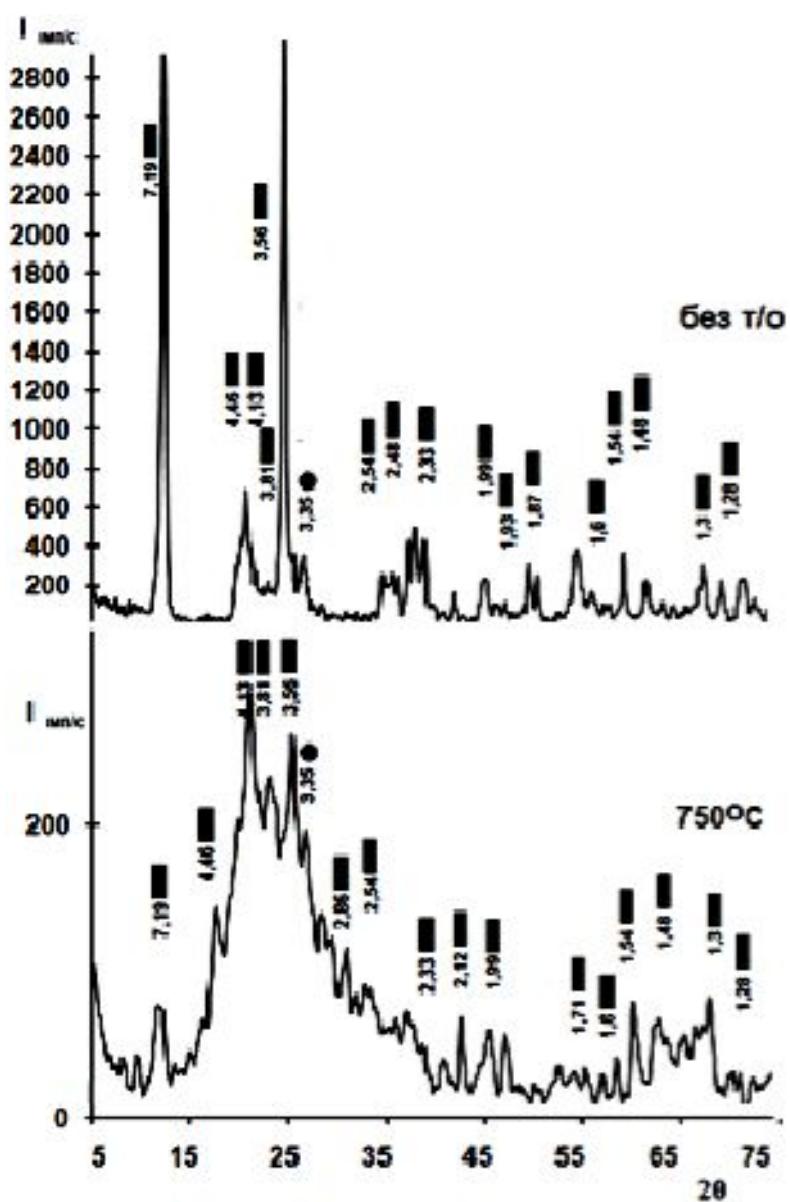


Рис. 1. Рентгенограми володимирського каоліну до та після термічної обробки при різних температурах

Аналогічний характер фазових змін відзначається для пологівського й мурзинського каолінів, однак деяка відмінність полягає в більш низьких температурах перетворення кристалічної решітки каолінітів в аморфний стан (відповідно при  $\sim 700$  °C й 650 °C), що, на нашу думку, пов'язано з невисоко-

ким ступенем упорядкованості їхньої кристалічної решітки (індекси впорядкованості структури Д. Хінклі відповідно для цих каолінів складають 0,49 і 0,66 ).

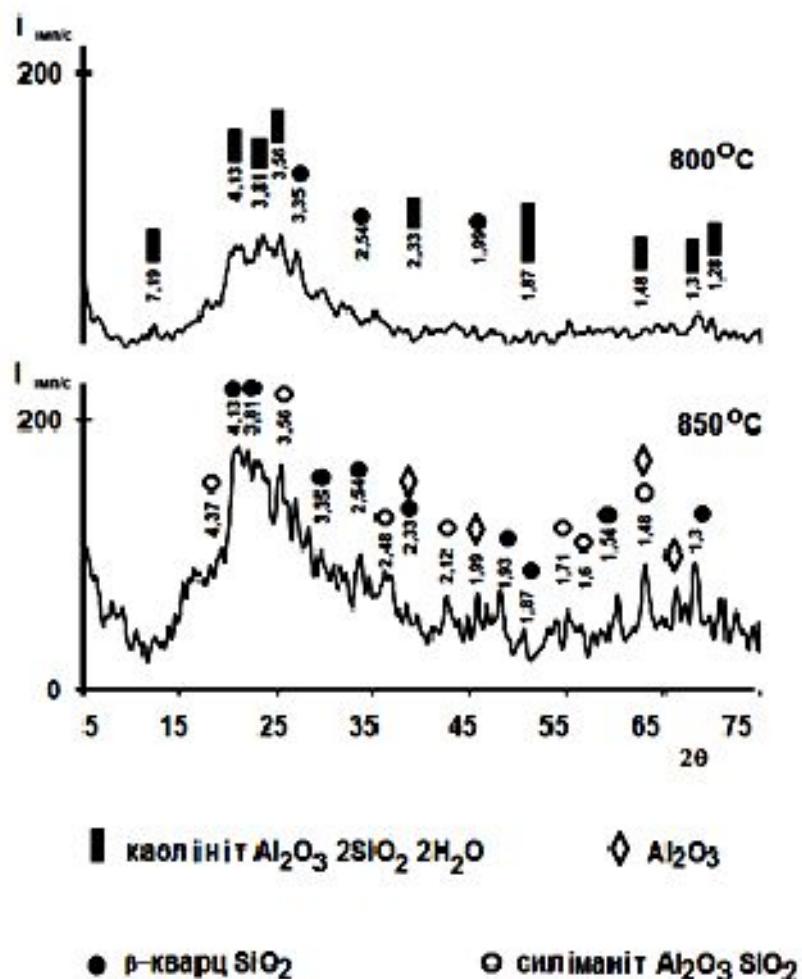


Рис. 2. Рентгенограми володимирського каоліну до та після термічної обробки при різних температурах

У таких каолінів втрачається хімічнопов'язана вода, а отже й руйнується решітка при більш низьких температурах, тоді як найбільш стійкою за ступенем збереженості є кристалічна решітка каолініту володимирського каоліну (індекс Д. Хінклі 1,15) – аморфізація його структури відбувається при більш високих температурах (800 – 850 °C).

Вказані відмінності зміни фазового складу метакаолінів, отриманих при різних температурах, будуть невід'ємно впливати на пузоланову активність при введенні їх до цементних розчинів. Для дослідження такого впливу на наступному етапі роботи були приготовлені будівельні суміші, які складались з 80 мас. % шлакопортландцементу марки М-400 та 20 мас. % кожного з

дослідних метакаолінів, отриманих при різних температурах.

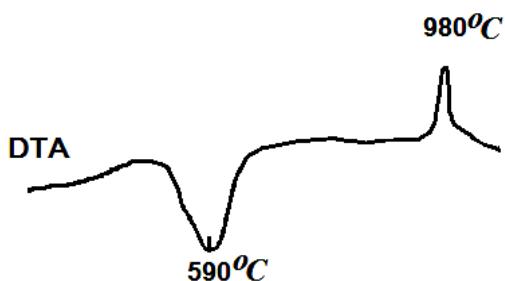


Рис. 3. Термограма володимирського каоліну

З метою запобігання небажаної гідратації активних компонентів останніх при контакті з повітрям, дослідні метакаоліни до введення їх до цементних розчинів зберігали в ексикаторі. Суміші затворяли однаковою кількістю води і, за стандартною методикою, визначали початок тужавлення отриманих розчинів. Крім того, із цих же розчинів були відлиті зразки балочки, на яких, після 7 діб вистоявання в природних умовах, визначали міцність при стисканні.

Результати визначення термінів тужавлення приведені на рис. 4.

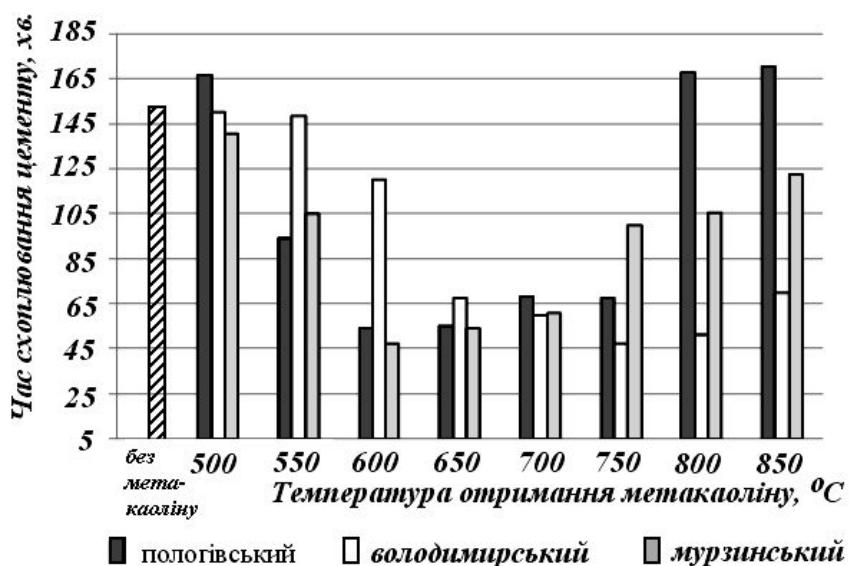


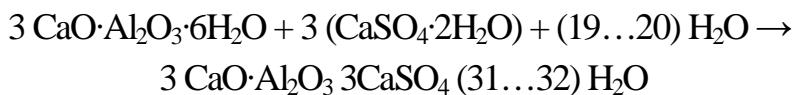
Рис. 4. Терміни тужавлення цементних розчинів з добавками метакаолінів, отриманих з дослідних каолінів при різних температурах.

Із приведених даних видно, що майже в усіх випадках введення дегідратованого каоліну позитивно впливає на скорочення термінів тужавлення цементного тіста. Однак для кожної з дослідних проб метакаолінів спостерігаються деякі особливості, які викликані, по-перше – умовами теплової обробки, а по-друге - природою самого каоліну.

Наприклад при введенні до складу цементних розчинів «пологівського» метакаоліну спостерігається спочатку незначне збільшення терміну тужавлення (якщо дегідратація проходила в межах 500 °C) до 166 хв. проти 150 хв. для базового складу (без метакаоліну). Потім, при підвищенні температури до 600 – 650 °C термін тужавлення цементних розчинів зменшується до 55 хв., після чого знов починає зростати, а введення метакаолінів, отриманих при 800 – 850 °C збільшує терміни тужавлення і навіть перевищує базовий.

Таку тенденцію, на нашу думку, можна пояснити інтенсивним утворенням етингіту  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$  [5], яке стимулюється поруватою структурою дегідратованого каолініту, що виконує роль «затравки» для його кристалізації. Отриманий в зазначеному інтервалі температур метакаолін має нестійку структуру, характерну нестабільному фазам  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ , тому частки (молекули)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  можуть активно брати участь в процесі утворення етингіту з присутніх в цементах вільного вапна та сульфату кальцію.

Термін тужавлення цементного тіста прямо залежить від інтенсивності утворення етингіту в процесі взаємодії гідроалюмінатів (що утворюються внаслідок взаємодії клінкерних мінералів  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  під час протікання реакції гідратації) і гідросульфатів кальцію (тобто гіпсу, який вводиться при помелі цементного клінкеру) [5]:



Утворення етингіту на ранніх стадіях твердиння сприяє швидкому зростанню міцності цементного каменю, але більш пізнє формування етингіту призводить до деструктивних процесів (зниження міцності за рахунок розріхлення структури матеріалу, що формується).

Як видно з приведеної реакції, до структури етингіту входить велика кількість води, яка під час кристалізації цієї сполуки викликає розширення і продукти гідратації збільшуються в об'ємі в 2 – 2,5 рази. Однак, разом із об'ємним розширенням, відбувається і нарощання міцності цементного каменю. Якщо утворення етингіту відбувається раніше, ніж у цементного каменю з'явиться мінімальна міцність, то етингіт буде «стискати» піддатливу гелеподібну структуру й руйнівного ефекта не відбудеться, а, якщо етингіт буде утворюватись після набору міцності цементного каменю, то з'являться

внутрішні напруги, які й обумовлюють зниження його міцності.

Зазвичай активна дія мінеральних наповнювачів, що вводяться до цементів, пов'язана з фізичним ефектом [6], який проявляється в тому, що дрібні часточки звичайно мають більш тонкий гранулометричний склад, ніж портландцемент, або з хімічним, що полягає в інтенсифікації реакцій гідратації активних складових цементу.

Метакаолін – являється добавкою комплексної дії, яка, з одного боку, є тонкодисперсною, тому може виступати у вигляді активних центрів, навколо яких групуються структурні продукти гідратації цементу, стимулюючи формування гідроалюмінатів, а отже й етрингіту. З іншого боку, утворення активних форм оксидів кремнію та алюмінію сприяє утворенню силікатів та алюмінатів кальцію в низькоосновних формах.

Отже, при наближенні структури каолініту при дегідратації до аморфного стану, зв'язки Al- та Si- існують в активному стані, тому легко може відбуватись приєднання інших елементних груп чи радикалів, в тому числі, утворення етрингіту. Але, цей процес є тривалим та не закінчується навіть через 7 діб витримки зразків, що обумовлює низьку механічну міцність затверділого цементного каменю.

В процесі аморфізації структури, в метакаоліні утворюються окрім  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{SiO}_2$ , і процес утворення етрингіту уповільнюється. Отже метакаолін залишається активним щодо тужавлення утвореного цементного каменю в той період, коли вже видаляється з решітки каолініту структурна вода, але утворення  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{SiO}_2$  ще не йде інтенсивно. Коли вже відбувається утворення  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , який бере участь в утворенні гідросульфонатів, тоді вже інтенсифікується процес – наростання механічної міцності.

Аналогічний характер зміни властивостей цементного каменю спостерігається з додаванням метакаолінів, отриманих з каолінів Володимирського та Мурзинського родовищ.

Як було нами очікувано, всі цементні розчини також проходять в процесі тужавлення через мінімальні значення, але температурні параметри отримання аморфізованих активних метакаолінів відрізняються, що, як було вже зазначено вище, обумовлено різною впорядкованістю кристалічної решітки їх каолінітів. Найшвидше тужавлення спостерігається у цементних розчинів з додаванням мурзинського метакаоліну, отриманого при температурах 600 – 650 °C, володимирського – при 750 – 800 °C, а пологівського – при 600 – 750 °C.

Інтерес представляють результати, отримані при вимірюванні міцності дослідних зразків цементного каменю (рис. 5).

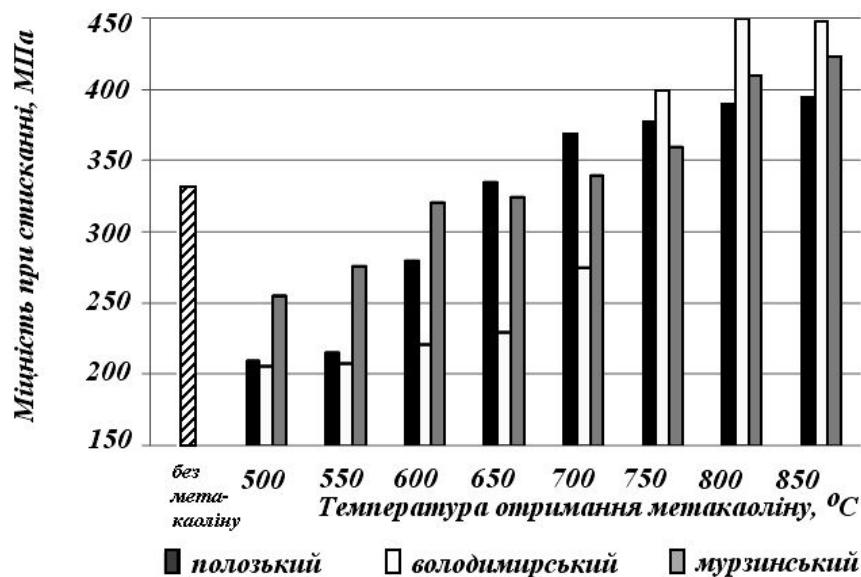


Рис. 5. Залежність механічної міцності цементного каменю від активності метакаолінів, отриманих при різних температурах

Із приведеного рисунку видно, що для всіх дослідних зразків спостерігається наступна тенденція: введення метакаолінів (незалежно від родовища вихідного каоліну), отриманих в низькотемпературному інтервалі, призводить до значного зниження механічної міцності цементного каменю. Це пояснюється тим, що в метакаолінах низькотемпературного прожарювання ще міститься значна кількість недегідратованого каолініту та пасивує твердиння цементу.

По мірі підвищення температури прожарювання каолінів, зростає й міцність цементного каменю, оскільки в метакаолінах, що вводяться, при руйнуванні кристалічної решітки каолініту збільшується кількість реакційноздатних  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [5]. Найбільша міцність спостерігається у зразків цементів, до складу яких вводили володимирський каолін, прожарений при температурах 750 – 850 °C; у зразків з пологівським каоліном – після прожарювання в межах 700 – 850 °C, у зразків з мурзинським каоліном – після прожарювання каоліну при 800 – 850 °C. Це пояснюється тим, що активні пузоланові компоненти в цементних розчинах сприяють зниженню концентрації гідроксиду кальцію у водному середовищі [6] до такого рівня, при якому порушуються умови стабільного існування високоосновних гідроалюмінатів кальцію ( $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot13\text{H}_2\text{O}$  і  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot6\text{H}_2\text{O}$ ) і створюються передумови їх переходу

в більш стійкі низько основні форми. Останнє призводить зазвичай до зменшення внутрішніх напруг і підвищення механічної міцності цементного каменю [5, 7].

Необхідно також зазначити, що найбільш підвищена міцність (до 450 кг/см<sup>2</sup> проти 330 кг/см<sup>2</sup> для базового зразка) може бути досягнена при використанні метакаоліну, виготовленого з володимирського каоліну при температурах 800 – 850 °C.

Таким чином, природа вихідного каоліну (ступінь впорядкованості кристалічної решітки каолініту) обумовлює одержання при різних температурах продуктів термообробки з різною активністю, їх вплив на властивості цементів, буде проявлятися по-різному, через що можна виділити декілька груп метакаолінів (рис. 6).



Рис. 6. Схема класифікації метакаолінів за їх активною дією в складі цементних сумішей

Найбільш універсальний за властивостями метакаолін можна отримати із володимирського каоліну після його термообробки в інтервалі 800 – 850 °C – саме при введенні такого метакаоліну спостерігається скорочення строків тужавіння цементного розчину та збільшення механічної міцності цементного каменю.

**Список літератури:** 1. Захаров С.А. Высокоэффективный метакаолин – современный минеральный модификатор цементных систем / С.А. Захаров, В.С. Калачик // Строительные материалы. – 2007. – № 5. – С. 56 – 57. 2. Королёв А.С. Сухие строительные смеси с добавкой метакаолина / А.С. Королёв, Ф.А. Зырянов, П.С. Омотин // Сухие строительные смеси. – 2008. – № 5. – С. 30 – 31. 3. Дворкін Л.Й. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах / Л.Й. Дворкін. – Київ: Видавництво КНУБіА, 2007. – 216 с. 4. Грум-Гржимайло О.С. Мулліт в кераміческих масах / О.С. Грум-Гржимайло // Труды НИИстройкерамики. – М.: Госстройиздат, 1975. Вип. 40 – 41. – С. 79 – 117. 5. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Коло-

кольников. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с. 6. Каримов И. Влияние тонкодисперсных минеральных наполнителей на прочность бетона / И. Каримов // Бетон в мире технологий. – 2006. – № 1. – С. 35 – 39. 7. Алексеев Е.В. О влиянии температурного режима получения высокоактивного метакаолина для строительных смесей на основе портландцемента / [Е.В. Алексеев, Е.С. Михайлута, В.В. Коледа и др.] // Современные технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов: II междунар. конф., 23-24 марта 2011г.: тезисы докл. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – С. 54.

Надійшла до редколегії 25.07.11

УДК 693.54.

**Л.А. КОЗИНКО**, інженер, НТУ«ХПІ», Харків

## **ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ АСПЕКТИ МОНОЛІТНОГО БУДІВНИЦТВА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СПОРУД**

Експериментальні дослідження корозійного стану сталевих елементів залізобетонних конструкцій в бетонах на портландських і шлакопортландських цементів. Деякі випадки адаптації залізобетону.

Экспериментальные исследования коррозионного состояния стальных элементов железобетонных конструкций в бетонах на портландских и шлакопортландских цементов. Некоторые случаи адаптации железобетона.

There are corrosion state of the reinforced steel in the portlandcement and portlandblast-slag cement. Same exempl adaptetion of the reinfoced concret.

Незахищене залізо та сталь підлягають дії корозійного впливу у більшості середовищ, та треба сказати, що ступінь корозійного руйнування залежить від ряду факторів, найбільш важливими з котрих є склад металу, стан його поверхні, властивості агресивного середовища та локальні умови експлуатації.

Якщо розглядати залежність якості металевих сплавів від їх складу, тоді залізні сплави можна розділити на три великих групи: звичайні чавуни, варочне залізо, сталі без додавання легуючих добавок. Ці матеріали легко піддаються корозії. Низьколеговані сталі, з добавками міді, хрому та нікелю, вмістом 2 – 3 % легуючих добавок також легко підлягають корозії, але при звичайних умовах досить довго експлуатуються. Такі низьколеговані сталі нази-

ваються старіючими. Нержавіючі сталі з високим складом легуючих компонентів, наприклад – 18 % хрому, 8 % нікелю та 3 % молібдену – ці сталі в атмосферних умовах є практично нержавіючими. Звичайні сталі представляють собою сплави заліза з вуглецем та невеликими добавками інших елементів, таких як марганець та кремній, що вводяться для покращення механічних властивостей; а також фосфору, що зменшує крихкість сталевого сплаву та зупиняє водне охрупачування та термічну корозію.

Сталеві сплави заліза виплавляють з суміші чавуна та лому сталевого заліза, при цьому частина вуглецю, сірки та фосфору окислюється та відводиться з доменним газом.

Кінцеву продукцію отримують після гарячого прокату, протягування або ковки. У процесі обробки поверхня сталі окислюється киснем повітря та на ній утворюється оксидна плівка, що може суттєво впливати на корозію сталі. У залізобетонних конструкціях ці оксиди, або вторинна окалина, являються внутрішнім резервом адаптації [1 – 7] у системі "бетон-залізо" при корозійних процесах та покращують зчеплення арматури з захисним шаром бетону, що також являється прикладом адаптації. Вторинна окалина складається з трьох шарів окислів заліза з зростаючою отупінню окислення. Сила окислення зростає у напрямку від нижньої до верхньої поверхні плівки. Внутрішній шар складається з закисі заліза двохвалентного ( $\text{FeO}$ ); середній з магнетиту ( $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), або суміші окисі заліза двохвалентного ( $\text{FeO}$ ) та трьохвалентного ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); та верхній шар складається з окислів заліза трьохвалентного ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [1 – 7]. Типова вторинна окалина має товщину 50 мкм та містить приблизно 70 % закисі заліза ( $\text{FeO}$ ), 20 % магнетиту ( $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) та 10 % окисі заліза трьохвалентного ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [9]. Наявність такої поверхневої плівки у лужному середовищі бетону може затримувати корозійні процеси тривалий час, бо упрочнюється шаром бетону, підлягає коліматації компонентами порово-го розчину бетону та інтеграції в хімічну систему «бетон-сталева арматура» залізобетону. Сталебетонні конструкції, що експлуатуються у морській воді, мають процеси взаємодії не тільки з хімічно-агресивними розчинами, а ще й механічну загрузку водними потоками, такими як хвилі, морські течії, припливи та відливи. Це все зумовлює явище стомлення. З'являється сукупність явища стомлення та фізичної і хімічної корозії, періодичного зволожування та висушування, сульфатного та хлоридного руйнування. За допомогою експерименту встановлено розмір електрохімічного потенціалу, дорівнюючий активному стану сталі, при якому має місце корозія. Формування та відкладення у трі-

щинах бетону, що експлуатується у морській воді, солей кальцію та магнію робить більш щільну структуру, що добре впливає на довговічність залізобетонних конструкцій. Карбонізація викликає зниження pH бетону і прискорення корозії арматури, особливо в умовах присутності морської води та кисню. Глибина карбонізації визначається залежністю:

$$D_C = A\sqrt{t}, \quad (1)$$

де  $t$  – час карбонізації;  $A$  – коефіцієнт швидкості карбонізації.

Моніторинг глибини карбонізації залізобетонних споруд з строком експлуатації 10 – 60 років показав, що для зовнішніх учасників коефіцієнт швидкості корозії склав 5 – 10 мм на рік. Тонкий захисний шар бетону та низька якість захисного слою бетону може викликати корозію арматури та руйнування бетону. Цей процес може інтенсифікуватись під дією морської солі, що проникає з оточуючого середовища. У зв'язку з цим стандарт Японської Асоціації Будівництва обмежує вміст морської солі у бетоні – до 0,04 %, коли арматура не має спеціального захисту і до 0,1 % для арматури з спеціальним захистом (9).

Для виготовлення робочих електродів взяли зразки сталі Ст 3, як приклад арматурної сталі, що експлуатується в звичайних умовах, наприклад у ненапруженіх огорождаючих панелях та конструкціях покрівлі. Площа робочої поверхні склала 1 см<sup>2</sup>. Перед тестом поверхня робочого електрода чиститься наждачним папіром, обезжирюється етиловим спиртом та промивається дистильованою водою. Потенціодинамічне моделювання робили за допомогою потенціостата PI 50 з програматором PR-8. Швидкість динаміки потенціалу складає 5 мВ/с, зміна струму фіксується двохкоординатним региструючим приладом PDA-1. Визначений струм при цьому має часткове відношення до геометричній поверхні дослідженого зразка. Усі заміри робляться у скляному електрохімічному елементі ISE-2. Допоміжний електрод зроблений з титану. Електродом зрівнювання служить насичений хлоросрібний електрод, потенціал котрого дорівнює 0,2 В. Усі значення потенціалів рахуються по водневому (стандартному) електроду. Визначення рівня pH здійснюється за допомогою pH-метру pH-150. Результатом експерименту є модель порового твердого розчину бетону з гарними захисними якостями та високою лужністю (рис. 1).

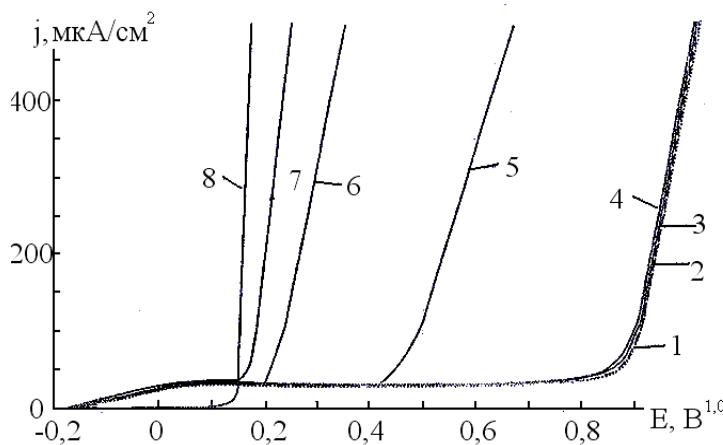


Рис. 1. Анодні потенціалодинамічні криві для сталі Ст. 3 при швидкості розвертки потенціалу 5 мВ/с в розчині NaOH при концентрації NaCl:  
 1 – 0 %, 2 – 0,025 % (0,0043 моль/дм<sup>3</sup>), 3 – 0,075 % (0,013 моль/дм<sup>3</sup>),  
 4 – 0,1 % (0,017 моль/дм<sup>3</sup>), 5 – 0,3 % (0,051 моль/дм<sup>3</sup>), 6 – 0,7 % (0,112 моль/дм<sup>3</sup>),  
 7 – 1 % (0,17 моль/дм<sup>3</sup>), 8 – 3 % (0,512 моль/дм<sup>3</sup>).

При додаванні 2 % добавки сульфату натрію до високолужного порово-го розчину також змодельоване випадок проникнення сульфатних вод крізь захисний шар бетону, та отримані дані електрохімічних процесів у приарматурному шарі бетону, що показало інгібуючу дію сульфатних іонів на сталеву арматуру залізобетону, і це є експериментально проілюстрованим прикладом адаптації бетону (дифузійна спроможність), адаптаційних механізмів за-лізобетону і роботу системи бетон-продукти дифузії та розчинення сталевої арматури [3, 4], як електрохімічної ячейки, робота якої направлена на паси-вацію заліза і зменшення швидкості корозії та адаптаційності арматурної не-напруженої сталі у елементах залізобетонних конструкцій (рис. 2).

Також був розглянутий експериментально спрощений випадок, коли за-хисний шар бетону повністю карбонізувався і втратив свої захисні властиво-сті, які забезпечуються високою лужністю порового розчину бетону [3, 4].

Для того, щоб краще ілюструвати модельований случай попадання хло-ридів в приарматурний шар бетону, як це характерно для морських споруд; на дорожніх покриттях при застосуванні антильодониторів; атмосферні агресивні дощі з розчиненими продуктами атмосферного забруднення для покрі-вель з залізобетону – анодні потенціометричні криві при їх аналізі показують, що на поверхні арматури утворюється потенціал, коли вона знаходиться у бетоні.

При застосуванні класичного уявлення темничної електрохімії у забез-печені адаптивності бетону, можна зробити висновок, що механізм гнучкого

зсуву потенціалу також треба розглядати як пристосування або адаптацію, при роботі залізобетонної системи.

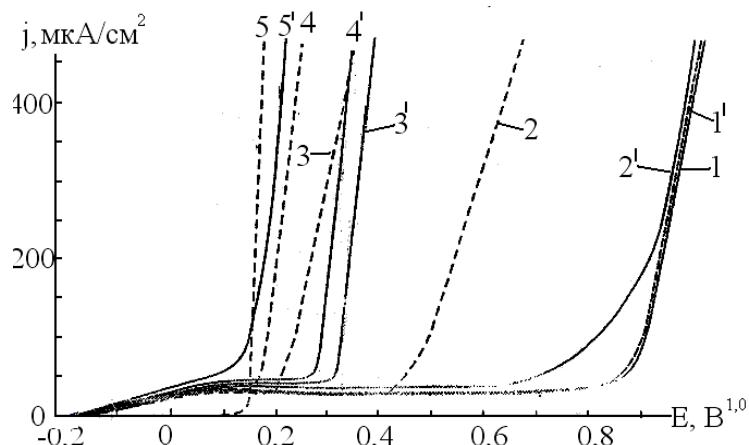


Рис. 2. Анодні потенціалодинамічні криві для сталі Ст. 3 при швидкості розвертки потенціалу 5 мВ/с в розчині NaOH с добавками NaCl (1 – 4) та

2 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1' – 4'), концентрація NaCl:

1, 1' – 0,1 % (0,017 моль/дм<sup>3</sup>), 2, 2' – 0,3 % (0,051 моль/дм<sup>3</sup>), 3, 3' – 0,7 % (0,112 моль/дм<sup>3</sup>),  
4, 4' – 1 % (0,17 моль/дм<sup>3</sup>)

Фактично у випадку коли аналізуються анодні потенціодинамічні криві для сталі у розчині хлориду натрію у малолужному розчині можна стверджувати, що зсув потенціалів є такий самий, як і для незахищеної залізної арматурної сталі.

**Список літератури:** 1. Бабушкин В.И. Защита строительных конструкций от коррозии, старения и износа / В.И. Бабушкин. – Х.: Высшая школа, 1989. – 117 с. 2. Крушедольская В.Е. Коррозионное поведение арматуры в бетонах на шлакопортландцементах / В.Е. Крушедольская, В.Я. Флакс, В.Л. Чернявский // Бетон и железобетон. – 1993. – № 3. – С. 28. 3. Козинко Л.А. Адаптация бетону. Позитивный всплеск адаптаций механизмов заливобетону на срок эксплуатации заливобетонных споруд / Козинко Л.А. // Науковий вісник будівництва ХДТУБА. – 2004. – № 26. – С. 75 – 80. 4. Чернявский В.Л. Адаптация бетону / В.Л. Чернявский. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2002. – 116 с. 5. Защита строительных конструкций от коррозии. СНиП 2.03.11-85. – [Действует с 1986-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 69 с. 6. Алексеев С. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Алексеев, С. Модры, П. Шиель. – М.: Стройиздат, 1990. – 499 с. 7. Wieczorek G. Wpływ chlorków na korozję stali zbrojeniowej w betonie / G. Wieczorek. – Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej, 1992. – 199 с.

Надійшла до редколегії 14.06.11.

**Д.В. РИНДЮК**, асистент, НУХТ, Київ,  
**Є.В. ШТЕФАН**, канд. техн. наук, доцент, НУХТ, Київ

## **МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЯЦІЇ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ УЩІЛЬНЕННЯМ**

У межах задачі нелінійного математичного програмування представлена методика пошуку оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу грануляції дисперсних матеріалів ущільненням. Методика основана на математичному моделюванні процесу екструзії дисперсних матеріалів крізь отвори матриці гранулятора. Методика дозволяє враховувати конструктивні особливості технологічного обладнання та реологічні властивості сировини.

В рамках задачи нелинейного математического программирования представлена методика поиска оптимальных конструктивно-технологических параметров процесса грануляции дисперсных материалов уплотнением. Методика основана на математическом моделировании процесса экструзии дисперсных материалов через отверстия матрицы гранулятора. Методика позволяет учесть конструктивные особенности технологического оборудования и реологические свойства сырья.

In the framework of a nonlinear mathematical programming technique is presented search for optimal design and technological parameters of the process of granulation of materials dispersed seal. The technique is based on mathematical modeling of the extrusion process of dispersed materials through the holes of the matrix pellet. The technique allows to take into account the structural features of the process equipment and rheological properties of raw materials.

Постановка проблеми та її зв'язок із найважливішими науковими і практичними завданнями. Останнім часом в харчовій та переробній промисловості виникла проблема по раціональному використанню відходів виробництва таких, як лузга соняшника, солома, жом, пивна дробина, деревна стружка та ін. Згідно закону України про стимулювання виробництва біопалива та зважаючи на світову енергетичну кризу подібні відходи доцільно використовувати в якості біопалива, комбікормів та ін. Але, зважаючи на невелику насипну густину таких матеріалів, транспортування їх є економічно не вигідним. Це обумовлює збільшення насипної густини цих матеріалів за рахунок ущільнення брикетуванням, тюкуванням, гранулюванням та ін. Виходячи з аналізу різних технологій ущільнення, процес гранулювання є найбільш раціональним, оскільки реалізується в безперервному режимі, дозволяє отримати ви-

роби найбільшої густини, а також забезпечує універсальність подальшого використання гранул (біопаливо, комбіорм різної фракції).

Аналіз останніх досліджень і публікацій [1, 2] свідчить, що ефективна реалізація технологій пресування методами екструзії в значній мірі залежить від конструктивних особливостей відповідного обладнання, що забезпечують його необхідні експлуатаційні показники. При цьому використання сучасних інформаційних технологій проектування [3] дозволяє визначити кількісні та якісні закономірності процесів ущільнення дисперсних матеріалів з різними структурно-механічними характеристиками. Враховуючи широку номенклатуру типів сировини, при визначені конструктивних характеристик відповідного обладнання виникає задача знаходження взаємозв'язку між основними конструктивно-технологічними параметрами конкретного вузла пресування. Оскільки ця задача багатопараметрічна то набуває актуальності пошук оптимального розподілу цих параметрів.

Метою даної роботи є створення методики визначення оптимальних параметрів основних елементів технологічного обладнання для грануляції дисперсних матеріалів ущільненням.

Схематично запропонований метод представлений на рисунку.

Технологія ущільнення реалізується шляхом екструзії сировини скрізь отвори матриці.

З рис. 1 видно, що для постановки задачі оптимізації у межах загальної теорії математичного програмування необхідно визначення взаємозалежностей між всіма параметрами, які прийняті для описування конкретного процесу гранулювання.

Тобто виникає необхідність у проведенні відповідних досліджень з метою встановлення кількісних залежностей, що описують термомеханічні та масообмінні процеси у матеріалі при його гранулюванні ущільненням.

Ефективність роботи преса-гранулятора оцінюється по якості (густині) гранул, а також продуктивності і енергоємності (потужності). Це одразу визначає кілька критеріїв оптимізації:

- 1 – максимізувати густину гранул;
- 2 – мінімізувати енергоємність (потужність);
- 3 – максимізувати продуктивність.

$$\rho(\alpha) \rightarrow \max; W(\alpha) \rightarrow \min; Q(\alpha) \rightarrow \max; \quad (1)$$

де  $\rho(\alpha)$  – густина гранул;  $W(\alpha)$  – потужність привода гранулятора;  $Q(\alpha)$  – продуктивність гранулятора.

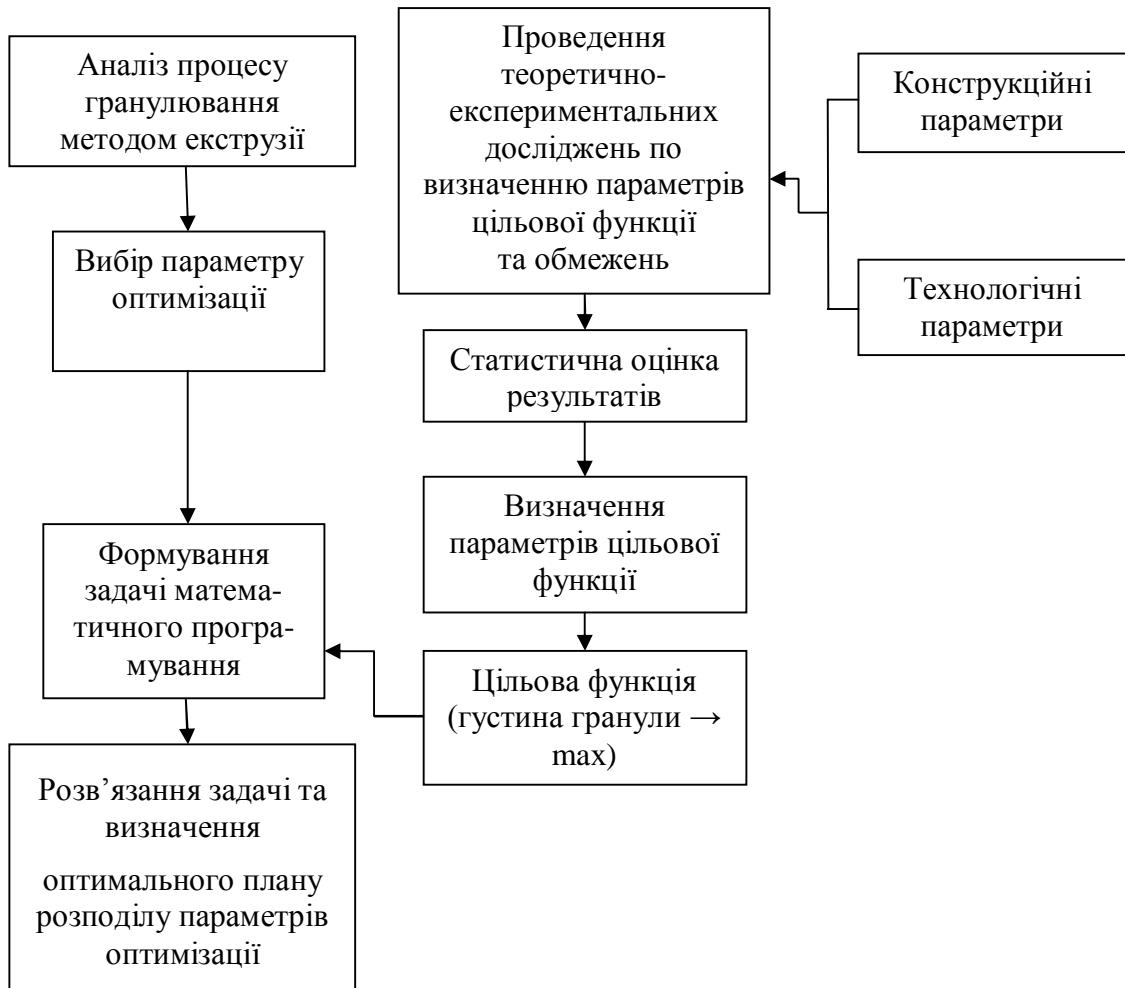


Рис. – Схема визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу грануляції дисперсних матеріалів ущільненням

З аналізу конструкції вузла пресування гранулятора та технології процесу гранулювання [4 – 6] маємо наступні обмеження для загальної задачі оптимізації:

$$40 \text{ мм} \leq L \leq 90 \text{ мм}, 8 \text{ мм} \leq d \leq 28 \text{ мм}, 50 \text{ МПа} \leq P \leq 300 \text{ МПа}, \quad (2)$$

де  $L$  – довжина фільтру матриці,  $d$  – діаметр фільтру,  $P$  – тиск пресування.

Отже, враховуючи (2) перепишемо (1):

$$\rho(L, d, P) \rightarrow \max; W(L, d, P) \rightarrow \max; Q(L, d, P) \rightarrow \max; \quad (3)$$

$$40 \leq L \leq 90, \quad 8 \leq d \leq 28, \quad 50 \leq P \leq 300 \quad (4)$$

Отже, сформульовано задачу оптимізації, що має три цільових функції. Перед нами постає проблема багатокритеріальності – тобто вибору рішення при наявності множини цільових функцій  $f = \{f_i(a)\}$  ( $I = 1, 2, \dots, M$ ), де  $a$  – деяка альтернатива, під якою розуміють безперервну векторну змінну, що належить випуклій замкнuttій області, яка, зазвичай, задається системою нерівностей [5]. Зрозуміло, що оптимум за кожним критерієм для сформульованих цільових функцій не завжди можна досягти при тому самому значенні керуючого параметру  $\alpha$ , то необхідно обумовити, як приймати рішення. Виникає проблема вибору однієї з ефективних альтернатив, тобто задача пошуку компромісу (компромісного рішення).

Альтернатива  $\alpha^0$  називається ефективною якщо не існує інших альтернатив, кращих хоча б по одному критерію і не гіршим по інших [5].

В нашому випадку критеріїї множини  $f$  мають різний фізичний зміст, а також одні з них мінімізуються, а інші максимізуються. Відмітимо, що якщо  $\alpha^0$  ефективна альтернатива множини критеріїв  $f = \{f_i(a)\}$  ( $I = 1, 2, \dots, M$ ), то  $\alpha^0$  – ефективна альтернатива множини функції  $\psi = \{\omega_i(f_i(a))\}$  ( $I = 1, 2, \dots, M$ ), де  $\omega_i(f_i(a))$  – монотонна функція  $f_i(a)$ .

Для знаходження ефективних точок необхідно перетворити функції  $\omega_i(f_i(a))$  на безрозмірні та такі що  $\omega_i(f_i(a)) \rightarrow \min$ . Для цього введемо наступні монотонні перетворення: для критеріїв, що мінімізуються

$$\omega_i(f_i(a)) = \frac{f_i^0 - f_i(a)}{f_i^0 - f_{i(\min)}}, \quad i = 1, \dots, m. \quad (5)$$

для критеріїв, що мінімізуються:

$$\omega_i(f_i(a)) = \frac{f_i(a) - f_i^0}{f_{i(\max)} - f_i^0}, \quad i = m+1, \dots, M. \quad (6)$$

де  $f_i^0$  – оптимальне значення  $i$ -го критерію,  $f_{i(\min)}$  – найменше значення максимізуючого критерію,  $f_{i(\max)}$  – найбільше значення мінімізуючого критерію.

Отже, необхідно розв'язати параметричну задачу:

$$man\psi(\alpha) = \min_{\substack{\alpha \in U \\ \alpha \in V}} \left\{ \sum_{i=1}^m \gamma_i \frac{f_i^0 - f_i(a)}{f_i^0 - f_{i(\min)}} + \sum_{i=m+1}^M \gamma_i \frac{f_i(a) - f_i^0}{f_{i(\max)} - f_i^0} \right\} \quad (7)$$

для всіх  $\gamma_i \in \gamma^+ \left\{ \gamma_i > 0, \sum_{i=1}^M \gamma_i = 1 \right\}$

Використаємо підхід при якому під компромісним розв'язком розуміють такий, що дає мінімальне відносне відхилення від оптимальних значень параметрів по всім критеріям в залежності від вагових коефіцієнтів  $\delta_i$ , таких, що  $\delta_i \in \delta^+ \left\{ \delta_i > 0, \sum_{i=1}^M \delta_i = 1 \right\}$

Розв'яжемо поставлену задачу, використавши даний підхід.

Залежності для цільових функцій  $\rho$ ,  $Q$  та  $W$  отримуємо згідно методики показаній в [4, 6].

Згідно (5) та (6) зведемо отримані для  $\rho$ ,  $Q$  та  $W$  залежності до безрозмірних та таких, що мінімізуються.

$$\rho^* = \frac{\rho_{opt} - \rho}{\rho_{opt} - \rho_{min}}, \quad (8)$$

де  $\rho = 58.04 + 9.8d + 15.72L + 4.25P - 0.049d \cdot P - 0.53d^2 - 0.09L^2 - 0.0065P^2$ ,  $\rho_{opt}$  – оптимальне значення функції  $\rho$ ,  $\rho_{min}$  – мінімальне можливе значення функції  $\rho$  з урахуванням обмежень (2):

$$Q^* = \frac{Q_{opt} - Q}{Q_{opt} - Q_{min}}, \quad (9)$$

де  $Q = 1745.5 + 35.78d + 18.2L + 10.96P + 0.132d \cdot P - 0.0443L \cdot P - 0.298L^2 - 0.018P^2$ ,  $Q_{opt}$  – оптимальне значення функції  $Q$ ,  $Q_{min}$  – мінімальне можливе значення функції  $Q$  з урахуванням обмежень (2):

$$W^* = \frac{W - W_{opt}}{W_{max} - W_{opt}}, \quad (10)$$

де  $W = 126.1 - 1.29L + 0.76P - 0.0013P^2$ ,  $W_{opt}$  – оптимальне значення функції  $W$ ,  $W_{max}$  – максимально можливе значення функції  $W$  з урахуванням обмежень (2).

Тоді для випадку (4) попередньо врахувавши (5), (6) та (7) маємо:

$$\min \psi(d, L, P) = \min_{\substack{d \in [8, 30] \\ L \in [40, 90] \\ P \in [50, 300]}} \left\{ \gamma_1 \frac{\rho_{opt} - \rho}{\rho_{opt} - \rho_{min}} + \gamma_2 \frac{Q_{opt} - Q}{Q_{opt} - Q_{min}} + \gamma_3 \frac{W - W_{opt}}{W_{max} - W_{opt}} \right\} \quad (11)$$

де  $\{\gamma_i > 0, \sum_{i=1}^3 \gamma_i = 1\}$ .

Основуючись на алгоритмі Левенберга-Марквардта, в програмному пакеті Mathcad 14, було створено програму для обчислення компромісних значень керуючих параметрів згідно запропонованої методики.

**Висновки.** Представлений підхід дозволяє сформулювати та вирішити задачу багатокритеріальної оптимізації для заданого набору керуючих параметрів вузла пресування у межах методів нелінійного математичного програмування.

Розв'язання поставленої задачі дозволяє отримати відповідні оптимальні параметри пресуючого вузла гранулятора для формулювання подальших проектних рішень.

**Список літератури:** 1. Штефан Є.В. Використання методів математичного моделювання для проектування вузлів преса-гранулятора / Є.В. Штефан, Д.В. Риндюк // Механіка та інформатика. – 2005. – С. 172 – 175. 2. Штефан Є.В. Визначення конструктивно-технологічних параметрів процесів переробки харчових матеріалів холодною екструзією / Є.В. Штефан, Ю.О. Заєць, Д.В. Риндюк // Комбікована промисловість України. – 2006. – № 5 (18). – с. 16 – 20. 3. Штефан Є.В. Моделювання поведінки дисперсних систем у нерівноважних процесах харчових виробництв/ Є.В. Штефан // Наукові праці УДУХТ. – 2000. – № 8. – С. 63 – 66. 4. Пат. 30058 У Україна, МПК (2006) B01J2/00. Спосіб визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора / Штефан Є.В., Риндюк Д.В.; заявник і патентовласник НУХТ. – № u200711256; заявл. 11.10.07; опубл. 11.02.08. 5. Химмельблau Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблau. – М.: Мир, 1975. – 534 с. 6. Риндюк Д.В. Методика визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу грануляції дисперсних матеріалів ущільненням / Д.В. Риндюк, Є.В. Штефан // Обладнання та технології харчових виробництв. – 2009. – Вип. 22. – С. 295 – 300.

Надійшла до редколегії 26.07.11

**Т.Б. ГОНТАР**, асистент, УИПА, Харьков,  
**С.М. ВИЛКОВ**, канд. техн. наук, приват-проф., УИПА, Харьков,  
**О.Б. СКОРОДУМОВА**, докт. техн. наук, проф., УИПА, Харьков

## **РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ**

У роботі досліджений вплив розміру гранул на структурно-механічні властивості екзотермічної суміші, призначеної для гарячого ремонту вогнетривких футерівок теплових агрегатів. Виконано оптимізацію отриманих результатів за допомогою симплекс-гратчастого методу й уточнений оптимальний інтервал дисперсності гранульованої екзотермічної суміші (1,0 – 0 мм), що може бути отриманий без відсівання тонкої фракції 0,2 – 0 мм.

В работе исследованное влияние размера гранул на структурно механические свойства экзотермической смеси, пред назначенной для горячего ремонта огнеупорных футеровок тепловых агрегатов. Выполнена оптимизация полученных результатов с помощью симплекс-решетчатого метода и уточнен оптимальный интервал дисперсности гранулированной экзотермической смеси (1,0 – 0 мм), которая может быть получена без отсева тонкой фракции 0,2 – 0 мм

It has been investigated the influence of the size of granules on structural-mechanical properties of exothermic mixture intended for hot repairs of refractory lining of heat units. Optimization is done of the results obtained with the help of the simplex-lattice method, and it is specified the optimal interval dispersion of granulated exothermic mixture (1,0 – 0 mm), which can be achieved without the elimination of fine fraction 0,2 – 0 mm.

Для горячего ремонта огнеупорных футеровок целесообразно использование гранулированных порошков экзотермических смесей [1 – 3].

Предварительное гранулирование наносимой экзотермической смеси необходимо не только для предотвращения уноса мелкозернистого порошка металла, но и для более полного поверхностного оплавления огнеупорного компонента смеси и его эффективного припекания к огнеупорной футеровке.

Для осуществления самораспространяющегося высокотемпературного синтеза имеет значение процесс подачи экзотермических смесей к ремонтируемой футеровке теплового агрегата, а именно достаточная текучесть порошка наносимого материала. Текучесть порошков обеспечивает стабильную подачу в распылитель и возможность точной регулировки расхода экзотермических смесей, является сложной комплексной характеристикой, зависящей

щей от насыпной плотности, гранулометрического состава, формы и состояния поверхности частиц.

Целью данных исследований являлась разработка оптимального гранулометрического состава экзотермических смесей.

**Материалы и методики исследований.** Для исследований использовали экзотермические смеси, имеющие размеры гранул: 3,0 – 2,0 мм; 2,0 – 1,0 мм; 1,0 – 0,5 мм; 0,5 – 0,2 мм; 0,2 – 0,1 мм.

В качестве огнеупорного компонента использовали бой динасowego кирпича (ГОСТ 4157-79). Горючий компонент – алюминиевую пудру (ГОСТ 5494-95), наносили на огнеупорный наполнитель при помощи связующего – жидкого стекла.

Для среднего гранулометрического состава каждой фракции экзотермической смеси определяли насыпную плотность, время истечения, углы внутреннего и внешнего трения.

Методика определения угла естественного откоса заключалась в следующем. Воронку опускали до касания с плоской металлической пластиной, заполняли ее порошком, а затем медленно поднимали над пластиной. Угол между образующей полученного конуса и основанием определяли с помощью транспортира.

Угол внешнего трения определяли по углу наклона плоской металлической пластины, при котором происходит ссыпание примерно 90 % навески порошка.

Для определения угла внутреннего трения готовили закрепленный kleem монослоем испытуемого порошка определенной фракции на плоской металлической поверхности. Угол наклона, при котором происходит ссыпание порошка той же фракции, принимали за угол внутреннего трения.

**Экспериментальная часть.** Зависимость насыпной плотности от среднего размера гранул экзотермической смеси представлена в таблице и на рис. 1.

Изменение среднего размера гранул в интервале 0,05 – 0,75 мм приводило к резкому повышению насыпной плотности порошка. При дальнейшем увеличении размера гранул (выше 0,75 мм) насыпная плотность практически не изменялась. Исследовали зависимость времени истечения экзотермической гранулированной смеси из градуированных воронок диаметром 12 мм, отвечающих размерам наиболее часто используемых сопел в системах подачи торкрет-установок (таблица, рис. 2).

Таблица

## Свойства фракционированного порошка

Свойства	Размер гранул, мм					
	3,0 – 2,0	2,0 – 1,0	1 – 0,5	0,5 – 0,2	0,2 – 0,1	0,1 – 0
Насыпная плотность, г/ см <sup>3</sup>	1,240	1,203	1,163	0,935	0,663	0,614
Время истечения порошка, с	31,5	25,7	19,6	18,4	23,2	–
Угол естественного откоса, град	36,25	35	33	32	34	–
Угол внутреннего трения, град	47,5	42	39	42	45	–
Угол внешнего трения, град	30	24,5	28	28	35	–

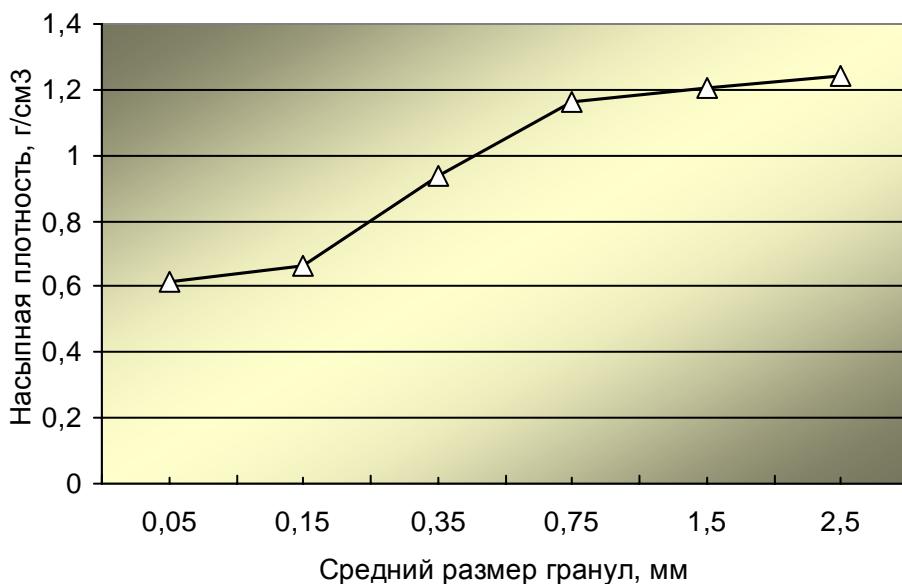


Рис. 1. Зависимость насыпной плотности от среднего размера гранул

Как видно из рисунка, минимальным временем истечения обладают экзотермические смеси, имеющие средний размер гранул 0,35 – 0,75 мм, что соответствует фракциям 0,5 – 0,2 и 1,0 – 0,5 (табл.) и, по-видимому, связано с меньшим внутренним трением между частицами.

Успешное нанесение экзотермических гранулированных смесей на ремонтируемую футеровку зависит от их текучести.

При длительном хранении часто имеет место агрегирование частиц, приводящее к комкованию и слеживанию порошков, что ограничивает применение экзотермических смесей. Критериями оценки текучести порошков служат такие показатели как угол естественного откоса и угол внутреннего трения.

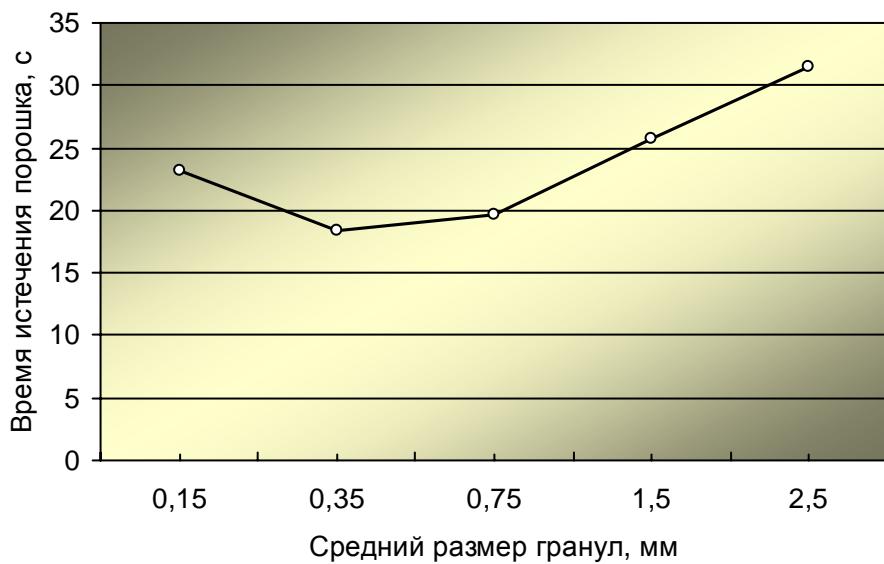


Рис. 2. Зависимость времени истечения экзотермической смеси от среднего размера гранул

Зависимость угла естественного откоса от среднего размера гранул экзотермической смеси различных фракций представлена в таблице и на рис. 3.

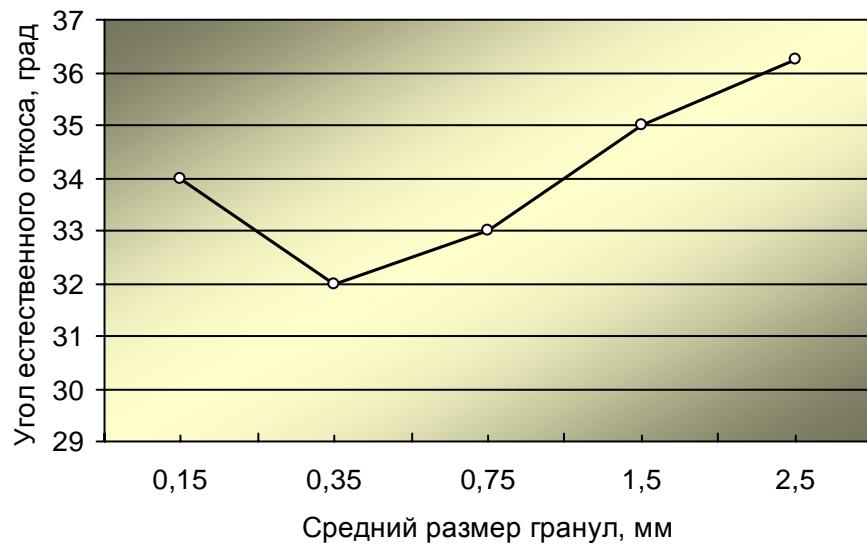


Рис. 3. Зависимость угла естественного откоса от среднего размера гранул

Из рисунка видно, что зона оптимума находится в интервале дисперсности гранул 0,35 – 0,75 мм.

Определяли углы внутреннего и внешнего трения в порошках исследуемых фракций. Угол внутреннего трения наиболее полно характеризует значение сил сцепления между частицами порошка.

Зависимость углов внешнего и внутреннего трения от дисперсности гранул представлена в таблице и на рис. 4.

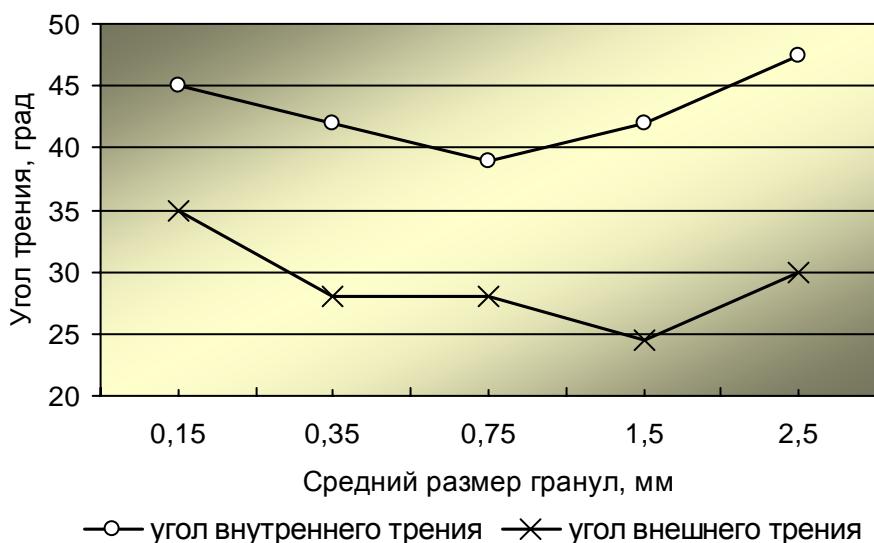


Рис. 4. Зависимость угла внутреннего и внешнего трения от среднего размера гранул

Минимальным углом внутреннего трения характеризовалась фракция 1,0 – 0,5 мм. Угол внутреннего трения был выше, чем угол внешнего трения, так как часть материала не скользила, а перекатывалась по поверхности, образованной закрепленным слоем экзотермической смеси.

Совместный анализ приведенных графиков позволил выявить, что оптимальный гранулометрический состав экзотермической смеси находится в диапазоне 0,2 – 1,0 мм. Недостатком предложенного состава является необходимость дополнительной технологической операции по отсеву фракций размером менее 0,2 мм.

Для устранения полученного недостатка применили симплекс – решетчатое планирование эксперимента для установления допустимого содержания в экзотермических смесях частиц с размером зерен ниже 0,2 мм, для чего составляли матрицу планирования эксперимента по изучению времени истечения порошка из воронки и определяли дисперсию воспроизводимости.

Вычислены коэффициенты регрессии, получена модель кубической степени приближения. Полученная модель проверена на адекватность. Для контрольных точек определены экспериментальные и расчетные значения времени истечения. Контрольные точки определялись в областях с максимальным, минимальным и средним временем истечения. Экспериментальные и расчетные данные совпали, что говорит об адекватности полученной мате-

матической модели.

С помощью полученной модели было рассчитано время истечения экзотермической смеси с размером частиц 1 – 0 мм с различным объемным содержанием фракций 1 – 0,5; 0,5 – 0,2 и 0,2 – 0 мм. Оптимальной временем истечения является скорость: от 18,3 до 19,1 с.

Аналогичным способом для экзотермической смеси фракция 1,0 – 0 мм с различным объемным содержанием фракций: 1 – 0,5, 0,5 – 0,2 и 0,2 – 0 мм построены адекватные математические модели для определения углов внутреннего (1) и внешнего (2) трения:

$$y = 42,33x_1 + 39,83x_2 + 41,66x_3 + 25,13x_1x_2 + 23,265x_1x_3 + 7,875x_2x_3 - 8,103x_1x_2(x_1-x_2) - 12,87x_1x_3(x_1-x_3) - 7,155x_2x_3(x_2-x_3) - 95,197x_1x_2x_3 \quad (1)$$

$$y = 34,66x_1 + 30,33x_2 + 26,66x_3 + 7,515x_1x_2 + 6,77x_1x_3 + 3,758x_2x_3 - 7,52x_1x_2(x_1-x_2) - 2,27x_1x_3(x_1-x_3) + 5,24x_2x_3(x_2-x_3) - 41,78x_1x_2x_3 \quad (2).$$

С помощью полученных моделей рассчитаны углы внешнего и внутреннего трения экзотермических смесей с размером частиц 1,0 – 0 мм с различным объемным содержанием фракций 1 – 0,5, 0,5 – 0,2 и 0,2 – 0 мм.

Для области составов с наибольшим временем истечения углы внутреннего трения составляют  $40 - 42^{\circ}39''$ , а углы внешнего трения –  $27 - 29^{\circ}$ .

Таким образом, проведенные исследования позволили установить область гранулометрических составов экзотермической смеси, характеризующихся оптимальной текучестью.

Выполненная оптимизация с помощью симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента позволила установить допустимость содержания в экзотермической смеси гранул размером  $< 0,2$  мм в количестве до 25 – 27 мас. %, что позволяет не отсеивать тонкую фракцию при приготовлении разработанной экзотермической смеси.

**Список литературы:** 1. Мержанов А.Г. Твердопламенное горение / А.Г. Мержанов. – Черноголовка: ИСМАН, 2000. – 224 с. 2. Владимиров В.С. Использование для металлургических и литейных производств новых огнеупорных СВС-материалов и покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами / В.С. Владимиров, А.П. Галаган, И.А. Карпухин // Автоматизированные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии: 2-я междунар. науч.-практ. конф.: тезисы докл. – М: МИСИ, 2002. – С. 570 – 574. 3. А.с. 494374 SU, МПК C04B35/68/53. Экзотермический огнеупорный мертель / Дябин В.В., Неволин В.М., Зaborовский В.М., Крутской Ю.Л. – № 96110828/03; заявл. 29.05.96, опубл. 27.02.01. Бюл. № 70.

## Содержание

1.	<b>П.И. ПИЛОВ, Л.Ж. ГОРОБЕЦ, Н.С. ПРЯДКО, Л.А. ЦЫБУЛЬКО, І.В. ВЕРХОРОБИНА</b> АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РАБОТЫ СТРУЙНЫХ МЕЛЬНИЦ РАЗЛИЧНОГО ТИПОРАЗМЕРА	3
2.	<b>Д.А. СТРАТИЙЧУК, А.Н. КАТРУША, И.П. ФЕСЕНКО, Т.И. СМИРНОВА</b> ИЗУЧЕНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ АІН, КАК СРЕДЫ, ПЕРЕДАЮЩЕЙ ДАВЛЕНИЕ ПРИ ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ	11
3.	<b>М.О. КАРЧЕВСЬКА</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗАВАНТАЖЕННЯ КУЛЬОВОГО МЛІНА РУДОЮ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛУ	18
4.	<b>Д.О. СТОРОЖЕНКО, О.Г. ДРЮЧКО, І.О. ІВАНИЦЬКА, Н.В. БУНЯКІНА</b> ДЕЯКІ ТЕНДЕНЦІЇ СТВОРЕННЯ ОКСИДНИХ РЗЕ-ВМІСНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НІТРАТНИХ СИСТЕМ	23
5.	<b>С.Д. БОРУК, А.І. ЕГУРНОВ</b> ПОЛУЧЕНИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИОННОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ	29
6.	<b>П.А. БАКУМ</b> ЭТАПЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ РУДОПОДГОТОВКИ ТИТАНОЦИРКОНИЕВЫХ ПЕСКОВ	34
7.	<b>О.А. КОРНИЕНКО</b> ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И СВОЙСТВА ФАЗ В СИСТЕМЕ $\text{CeO}_2 - \text{Sm}_2\text{O}_3$ ПРИ 1100 °C	41
8.	<b>Л.С. САВИН, В.Н. МАКАРОВА</b> КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА	45
9.	<b>Э.С. ГЕВОРКЯН, В.А. ЧИШКАЛА, О.М. МЕЛЬНИК</b> НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ С ПРЯМЫМ ПРОПУСКАНИЕМ ТОКА	50
10.	<b>І.О. СОЛОВЬОВА, В.В. ПІСЧАНСЬКА, О.С. НАУМОВ</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗЕРНОВОГО СКЛАДУ КАРБІДУ КРЕМНІЮ НА ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОЦЕМЕНТНОГО БЕТОНУ СИСТЕМІ $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$	55
11.	<b>І.А. ИВАХНЕНКО, Т.Н. ИВАХНЕНКО</b> О СОСТАВЛЕНИИ ГЛАГОЛЬНЫХ КОНКРЕТИЗАЦИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ	60
12.	<b>К.Ю. ДЕЙНЕКА</b> ВСТАНОВЛЕННЯ УМОВ САМОЗБУДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛІНА	72
13.	<b>Ю.В. НАУМЕНКО</b> СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО РЕЖИМУ РУХУ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛІНА	79
14.	<b>О.В. КАРАСІК, Я.В. ЛІСЯК</b> ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА КІНЕТИКУ ПОМЕЛУ ТА СТРУКТУРУ ПІНОСКЛА	85

15.	<b>І.А. ЕМЕЛЬЯНОВА, В.В. БЛАЖКО, А.И. АНИЩЕНКО, О.В. ДОБРОХОДОВА</b> ОСОБЕННОСТИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ В СМЕСИТЕЛЯХ, РАБОТАЮЩИХ В КАСКАДНОМ РЕЖИМЕ	89
16.	<b>А.А. ПЛУТИН, М.Г. САЛИЯ, Т.А. КОСТЮК</b> ИЗОТРОПНОЕ МИКРОАРМИРОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРОДУКТАМИ ГИДРАТАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ	97
17.	<b>В.Ф. ГАНКЕВИЧ, Р.Н. БЖЕЗИЦКИЙ</b> РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	104
18.	<b>Н.И. СОКУР, Л.М. СОКУР, И.Н. СОКУР</b> ЦЕНТРОБЕЖНАЯ ДРОБИЛКА С ДЕМПФИРУЮЩЕЙ МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКОЙ РОТОРА	109
19.	<b>В.П. НАДУТЬЙ, И.П. ХМЕЛЕНКО, П.В. ЛЕВЧЕНКО</b> ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА	114
20.	<b>В.Д. РУДЬ, Т. Н. ГАЛЬЧУК</b> МОДЕлювання процесу подрібнення порошків сталі ШХ15, отриманих із відходів машинобудівного виробництва в кульових млинах	121
21.	<b>І.В. РУССУ, В.М. ПРИСАК, І. КИРИКУЦА, І. КОНСТАНТИНЕСКУ</b> ОПТИМИЗАЦІЯ СОСТАВОВ И СВОЙСТВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦІЙ	127
22.	<b>І.Ю. ШУТЕЕВА, Г.Д. СЕМЧЕНКО, О.Н. БОРИСЕНКО,</b> ІССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ САМОТВЕРДЕЮЩИХ КОРУНДОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАЩИТЫ ГРАФИТА ОТ ОКИСЛЕНИЯ	137
23.	<b>С. КОВАЛЬ, М. СИТАРСКИ, Н. АБИД</b> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБАВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА	143
24.	<b>О.С. МИХАЙЛЮТА, Є.В. АЛЕКСЄЄВ, В.В. КОЛЄДА, Т.О. ШЕВЧЕНКО, С.В. МАКУЩЕНКО</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ОДЕРЖАННЯ МЕТАКАОЛІНІВ ТА ЇХ ФАЗОВОГО СКЛАДУ НА ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ	150
25.	<b>Л.А. КОЗИНКО</b> ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ АСПЕКТИ МОНОЛІТНОГО БУДІВНИЦТВА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СПОРУД	159
26.	<b>Д.В. РИНДЮК, Є.В. ШТЕФАН</b> МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЯЦІЇ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ УЩІЛЬНЕННЯМ	164
27.	<b>Т.Б. ГОНТАР, С.М. ВІЛКОВ, О.Б. СКОРОДУМОВА</b> РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ	170

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

# ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ “ХПІ”

Тематичний випуск  
“Хімія, хімічна технологія та екологія ”

## Збірник наукових праць

Випуск № 50

Науковий редактор д.т.н., проф. М.І. Рищенко

Технічний редактор С.З. Зеленцов

Відповідальний за випуск к.т.н. І.Б. Обухова

Обл.-вид. № 157-11

Підп. до друку 09.11.2011 р. Формат 60x84 1/16. Папір офісний.  
RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10. Обл.-вид. арк. 10.  
Наклад 300 прим. Перший завод 1-100. Зам. № 56877. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ “ХПІ”.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

---

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.

Свідоцтво № 2480017000040432 від 21.03.2001 р.

61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16