



Министерство образования и науки РФ
Российский фонд фундаментальных исследований
Правительство Белгородской области
Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет



РЕГИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области

Белгород
20 – 21 апреля 2017



Министерство образования и науки РФ
Российский фонд фундаментальных исследований
Правительство Белгородской области
Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет



Региональная научно-техническая конференция

**по итогам конкурса ориентированных фундаментальных
исследований по междисциплинарным темам,
проводимого Российским фондом фундаментальных
исследований и Правительством Белгородской области**

Сборник докладов

**Белгород
20 - 21 апреля 2017**

СОДЕРЖАНИЕ

Аткарская А.Б., Бедина В.И., Нарцев В.М., Рубанов Ю.К., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Исследование и разработка новых функциональных материалов для оптических и лазерных систем.....	6
Богданов В.С., Фадин Ю.М., Латышев С.С., Юдин К.А., Гавриленко А.В., Авдеев Я.А. Уравнение кинетики процесса измельчения в горизонтальной валковой мельнице	22
Большаков А.Г., Лоншаков Д.А. Принципы повышения социальной эффективности пространственной структуры г. Белгорода	31
Борисов И.Н., Мишин Д.А., Головизнина Т.Е., Мандрикова О.С. Горючие техногенные отходы в технологии производства цемента.....	39
Ващенко Р.А., Бажанов А.Г., Рубанов В.Г. Исследование и анализ моделей технологических величин в виде нечетких диаграмм поведения	51
Ващилин В.С., Колесник В.В., Евтушенко Е.И., Карацупа С.В., Корнилов А.В., Зайцев С.В., Прохоренков Д.С., Лимаренко М.В. Радиационный отжиг покрытий TiO_x сформированных реактивным магнетронным методом.....	57
Везенцев А.И., Перистый В.А., Тохтарь В.К., Коробов В.А., Буханов В.Д., Соколовский П.В., Перистая Л.Ф., Михайлюкова М.О. Изучение процессов фазо- и структурообразования, протекающих при совместном пиролизе растительных отходов агропромышленного комплекса Белгородской области с монтмориллонит содержащими глинами.....	63
Глаголев С.Н., Герасимов М.Д. Теоретические и технические резервы повышения эффективности работы вибрационных машин...	79
Дороганов В.А., Дороганов Е.А., Перетокина Н.А., Онищук В.И., Трепалина Ю.Н., Гавшина О.В. Принципы формирования высокоплотных керамических композитов	86
Дуюн Т.А., Гринек А.В., Рубанов В.Г., Хуртасенко А.В. Математическое моделирование и оптимизация процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на основе нечеткой логики	105
Иванов О.Н., Суджанская И.В., Даньшина Е.П., Любушкин Р.А., Япынцев М.Н., Васильев А.Е. Синтез, структура и электрофизические свойства композиционного	

керамического материала со свойствами твердого электролита на основе системы $ZrO_2-SrTiO_3-BiScO_3$	115
Ивашук О.А., Константинов И.С., Ивашук О.Д., Федоров В.И. Исследование и разработка распределенной автоматизированной системы интеллектуального экомониторинга и управления экологической безопасностью городских территориальных агломераций.....	123
Коновалов В.М., Новоселов А.Г., Мандрикова О.С. Использование отходов в производстве цементов	137
Лесовик В.С., Володченко А.А. Создание интеллектуальных композитов на основе положений геоники.....	145
Лесовик Р.В., Агеева М.С., Ключев С.В., Лесовик Г.А., Сопин Д.М. Фибро-текстиль бетоны на основе техногенных песков Белгородской области.....	156
Логачев А.К., Крюков И.В., Попов Е.Н., Семенов А.С., Крюкова О.С. Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений....	170
Мамаев В.В., Новиков С.А., Петров С.И., Зайцев С.В., Прохоренков Д.С. Исследование влияния условий формирования методом молекулярно-лучевой эпитаксии буферных слоев ALN И ALGAN на структурное совершенство приборных структур для СВЧ транзисторов и оптоэлектронных приборов ультрафиолетового диапазона	180
Маторин С.И., Жихарев А.Г., Кондратенко А.А. Развитие фундаментальных аспектов интеллектуальной информационной технологии управления сложными технологическими процессами на основе оригинального системного подхода "Узел-функция-объект"	188
Нарцев В.М., Зайцев С.В., Прохоренков Д.С., Ващилин В.С., Евтушенко Е.И. Влияние подслоя на структуру нитрида алюминия, осажденного магнетронным напылением	205
Нелюбова В.В., Бондаренко А.И., Переверзев М. Микроструктура цементного камня на основе композиционных вяжущих различного состава	212
Новиков И.А., Боровской А.Е., Боровская О.Ю., Буряченко Н.А. К вопросу создания единой имитационной модели транспортной инфраструктуры городской агломерации	217
Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Матюхин П.В., Ястребинская А.В. Снижение радиоактивных загрязнений	

поверхности стальных конструкций радиационно-защитного транспортного контейнера на основе железорудного сырья КМА	228
Перькова М.В. Принципы градостроительного развития элементов и сети малых городов и агломераций Белгородской области	235
Полунин А.И. Теоретические основы динамики вращающихся на опорах колец и оболочек	245
Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Старченко С.А. Фундаментальные закономерности влияния состава и строения оксифенольных олигомеров на пластификацию цементных смесей ..	261
Рыбак Л.А., Гапоненко Е.В. Программное управление роботом-гексаподом для послойной печати изделий	269
Строкова В.В., Огурцова Ю.Н., Боцман Л.Н. Особенности использования активных модифицирующих компонентов на основе природного и техногенного сырья для эпикристаллизационного модифицирования	279
Тарасова Г.И., Свергузова С.В., Старостина И.В., Уральский В.И., Севостьянов М.В. Разработка энерго – и ресурсосберегающей технологии получения синтетических железоксидных пигментированных материалов многоцелевого назначения, основанной на механической, термической и физико-химической модификации техногенного сырья горно-обогатительных предприятий металлургического комплекса	286
Черноморец А.А., Петина М.А., Лебедева М.Г., Болгова Е.В., Зайцева Н.О., Коваленко А.Н., Черноморец Д.А. О разработке информационной технологии мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек Белгородской области	298
Ядыкина В.В., Траутвайн А.И., Холопов В.С. Эффективность использования добавок ДАД-ТА для приготовления теплого асфальтобетона	316
Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В., Павленко З.В. Структурно-фазовые превращения в многокомпонентных железосодержащих системах под действием радиационно-термического воздействия	323

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ И ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

atkarsk06@mail.ru

¹Аткарская А.Б., д-р техн. наук,

¹Бедина В.И., канд. техн. наук,

¹Нарцев В.М., канд. техн. наук,

¹Рубанов Ю.К., канд. техн. наук,

²Чартий П.В., канд. физ.- мат. наук,

²Шеманин В.Г. д-р физ.-мат. наук

¹ *Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

² *Новороссийский политехнический институт Кубанского
государственного технологического университета*

Аннотация. Толщина растёт с увеличением объёмной доли дисперсной фазы и размера частиц золь, показатель преломления повышается с увеличением плотности упаковки частиц и объёмной доли дисперсной фазы, светопропускание снижается с ростом объёмной доли дисперсной фазы. Пороговая плотность энергии, необходимая для абляции лазерным наносекундным импульсом, увеличивается с ростом коэффициента отражения композита. Пороговая плотность энергии, необходимая для абляции лазерным микросекундным импульсом, возрастает с увеличением размера частиц и уменьшается по мере роста объёмной доли дисперсной фазы и плотности упаковки частиц. В одно- и двухслойных покрытиях пороговые плотности энергии нано- и микросекундного лазерного импульсов понижаются с ростом микротвёрдости покрытия. Пороговая плотность энергии микросекундного лазерного импульса понижается с ростом температуры плавления и растёт с увеличением микротвёрдости по Виккерсу модифицирующего оксида. Пороговые плотности энергии увеличиваются с ростом толщины покрытия. Микротвёрдость композитов снижается с увеличением толщины покрытия. Толщина однослойных покрытий и фотокаталитическая активность композитов изменяются однонаправлено. Фотокаталитическая активность композитов повышается с уменьшением плотности упаковки частиц дисперсной фазы в слой покрытий. Для композитов с двухслойными

покрытиями (барьерный слой SiO_2 + функциональное покрытие) получены идентичные зависимости фотокаталитической активности от толщины и плотности упаковки частиц в слой. С увеличением количества слоев светопропускание композитов снижается, что может быть связано с усилением отражения и (или) рассеивания материала покрытия. Обнаружена надежная взаимосвязь между пороговыми энергиями лазерного абляционного разрушения и светопропусканием композитов. Микротвердость композитов повышается с увеличением количества слоев, что может объясняться достаточно высокой микротвердостью по Виккерсу материалов, составляющих слой, $7 - \text{SiO}_2$ и $5,5-6,5 - \text{TiO}_2$ (в зависимости от кристаллической формы).

Ключевые слова: золь-гель технология, пороговые плотности энергии, лазерное абляционное разрушение покрытий, пленкообразующий золь, объемная доля дисперсной фазы золя, плотность упаковки частиц в слой, показатель преломления покрытия, коэффициент отражения, светопропускание образцов с покрытием.

Исходные материалы и методы исследования.

Материалы. Подложки - флоат-стекла размером 50x50 и толщиной 4 мм марки М1 по ГОСТ 111-2003

Оксид	Прекурсор
TiO_2	Тетраэтоксититан $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, «Ч», ТУ 6-09-11-2170-97
CdO	Кадмия оксид «ЧДА», ГОСТ 11120-75
CuO	Меди (II) оксид «ЧДА», ГОСТ 16539-79
Fe_2O_3	Железо (III) оксид «ЧДА», ГОСТ 4173-77
SnO	Олова (II) оксид «Ч», ТУ 6-09-1503-76
ZnO	Цинка окись «ЧДА», ГОСТ 10262-73

Растворитель – абсолютированный изопропиловый спирт по ГОСТ 9805-84, гидролиз – кислый, катализатор гидролиза алкоксида титана – соляная кислота ЧДА по ГОСТ 3118–77 или азотная кислота ос. ч. по ГОСТ 11125-84 одноименная с кислотой, использованной для растворения модифицирующих оксидов.

Метод синтеза покрытий. Двухсторонние покрытия наносили окунанием подложек в пленкообразующие растворы по золь-гель технологии. Скорость извлечения подложки (скорость нанесения) составляла 3,8; 5,8 или 17,3 мм/с. Далее, образцы выдерживали при комнатной температуре в течение 1,5 ч и подвергали термообработке в СВЧ-печи в течение 30 мин.

Методы исследований. Кинематическую вязкость измеряли вискозиметром ВПЖ-1, плотность - денсиметром, светопропускание в слое толщиной 20 мм на длинах волн 315,364, 400, 540 и 670 нм измеряли с помощью прибора КФК-3.

По результатам измерений рассчитывали объемную долю дисперсной фазы ϕ :

$$\eta = \eta_0(1+2,5\phi) \quad (1)$$

где η, η_0 - вязкости соответственно золя и растворителя.

Размер частиц дисперсной фазы d рассчитывали по уравнению Геллера, исходя из данных светопропускания зольей. Плотность упаковки частиц дисперсной фазы γ рассчитывали по выражению:

$$\gamma = 0,75 \cdot d \cdot \phi \quad (2)$$

Исследование композитов. Толщину h и показатель преломления n пленки измеряли методом спектральной эллипсометрии (прибор Uvisel 2). Пропускание света T (в процентах) образцов в видимой области спектра 400-700 нм регистрировалось микроспектрометром типа FSD-8, микротвердость композитов измеряли прибором NEXUS 4504. Оптическую прочность к лазерному излучению (1064 нм) исследовали на лабораторной установке лазерной абляции.

Экспериментальные результаты и основные выводы.

Влияние характеристик золя на толщину покрытия [1-12].

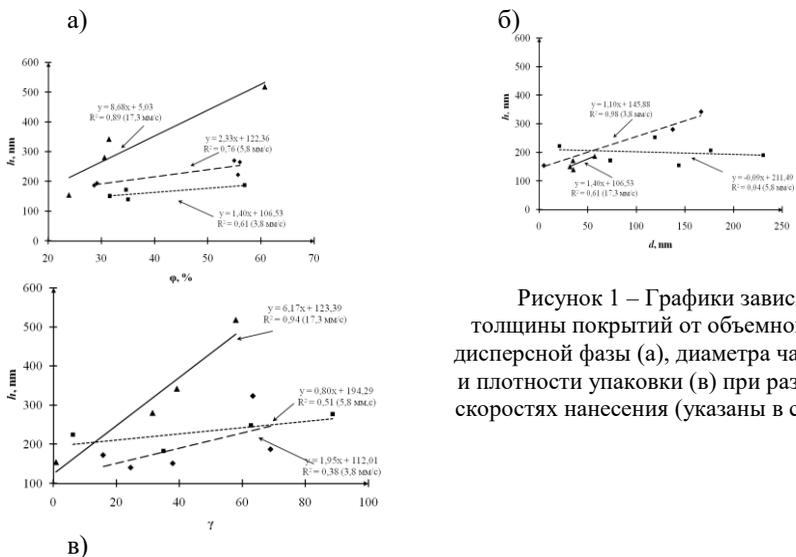
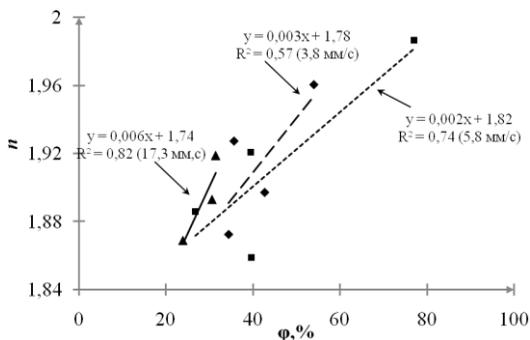


Рисунок 1 – Графики зависимости толщины покрытий от объемной доли дисперсной фазы (а), диаметра частиц (б) и плотности упаковки (в) при различных скоростях нанесения (указаны в скобках)

Влияние характеристик золь на показатель преломления покрытия

а)



б)

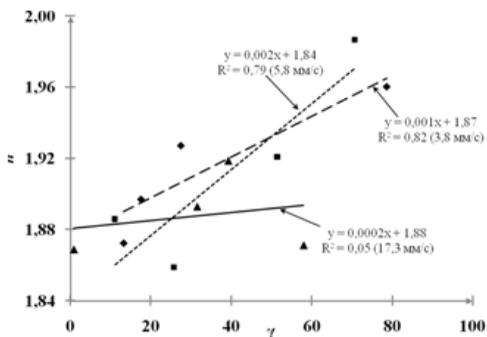


Рисунок 2 – Графики зависимости показателя преломления покрытий от объемной доли дисперсной фазы (а) и плотности упаковки (б) при различных скоростях нанесения (указаны в скобках)

Показатель преломления золь-гель покрытий определяется их пористостью и составом газов, заполняющих поры:

$$n_{\text{eff}} = n_1 - \Pi(n_1 - n_3) - (n_2 - n_3) \cdot f(P/P_0), \quad (3)$$

где n_{eff} , n_1 , n_2 , n_3 – соответственно показатели преломления самой пленки, скелета материала пленки, адсорбированной воды и воздуха; Π – пористость материала; функция $f(P/P_0)$ принята равной 1.

Влияние характеристик золь на пропускание света композитами

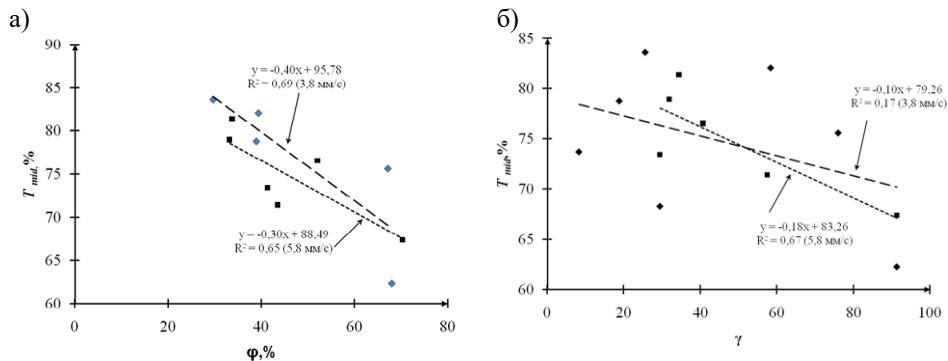


Рисунок 3 – Графики зависимости пропускания света композитами от объемной доли дисперсной фазы (а) и плотности упаковки частиц в слой (б) при различных скоростях нанесения (указаны в скобках)

Зависимость коэффициента отражения R материала от его показателя преломления n определяется формулой:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (3)$$

Абляционное разрушение покрытий нано- и микросекундным лазерным импульсом

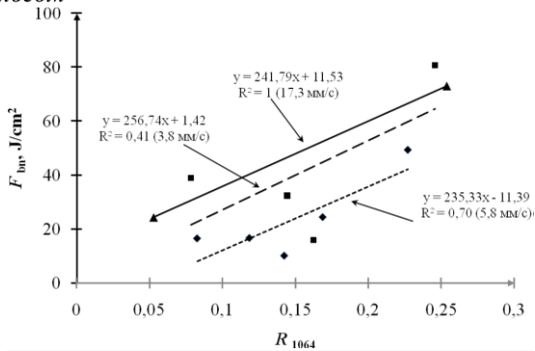


Рисунок 4 – График зависимости пороговой энергии лазерной абляции покрытий (наносекундный импульс) при различных скоростях нанесения (указаны в скобках).

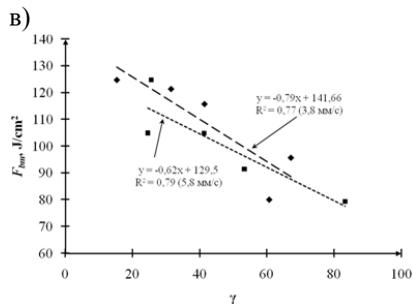
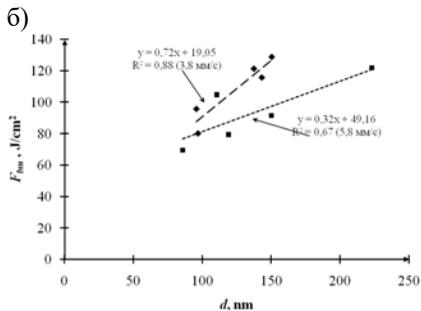
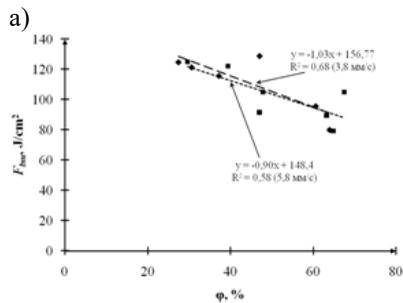


Рисунок 5 – Графики зависимости пороговой энергии лазерной абляции (микросекундный импульс) покрытия от объемной доли дисперсной фазы (а), диаметра частиц (б) и плотности упаковки (в) при различных скоростях нанесения (указаны в скобках)

Основные выводы подраздела

1. Изучен механизм влияния структурных параметров дисперсной фазы золь на оптические свойства покрытий и их устойчивость и лазерной абляции. В частности, толщина растет с увеличением объемной доли дисперсной фазы и размера частиц золь, показатель преломления повышается с увеличением плотности упаковки частиц и объемной доли дисперсной фазы, светопропускание снижается с ростом объемной доли дисперсной фазы.

3. Пороговая плотность энергии, необходимая для абляции лазерным наносекундным импульсом, увеличивается с ростом коэффициента отражения композита.

2. Пороговая плотность энергии, необходимая для абляции лазерным микросекундным импульсом, возрастает с увеличением размера частиц и уменьшается по мере роста объемной доли дисперсной фазы и плотности упаковки частиц.

Взаимосвязь оптической и механической прочности композитов с золь-гель покрытиями [13-25].

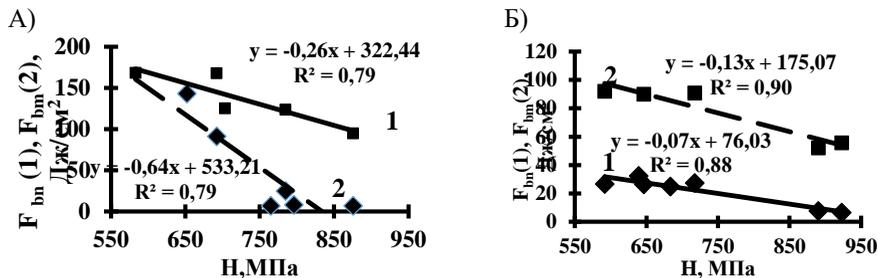


Рисунок 6 – Взаимосвязь оптической и механической прочности композитов. А- однослойные, Б- двухслойные покрытия. Скорость нанесения 3,8 мм/с.

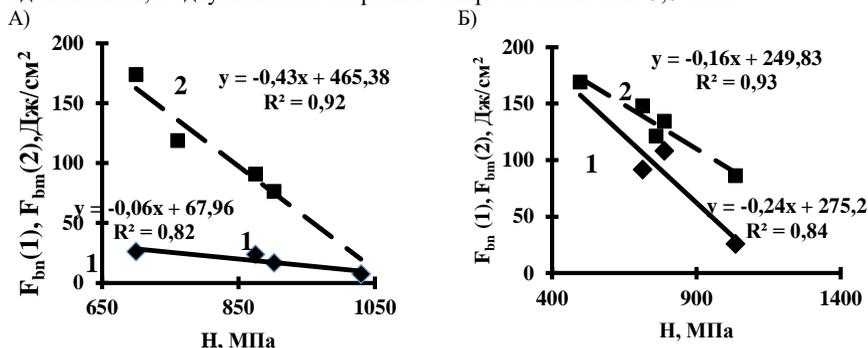


Рисунок 7 – Взаимосвязь оптической и механической прочности композитов. А- однослойные, Б- двухслойные покрытия. Скорость нанесения 5,8 мм/с.

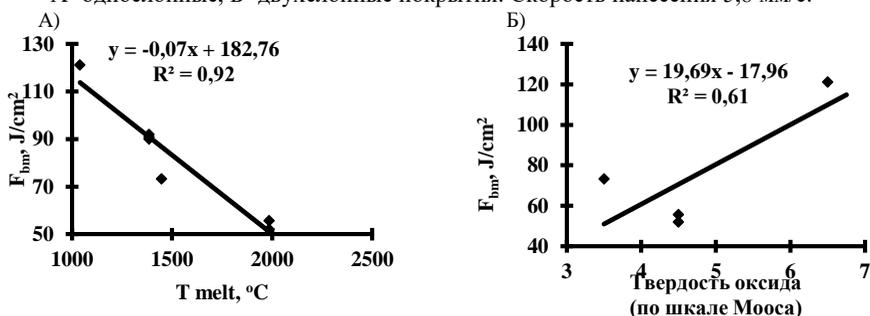


Рисунок 8 – Графики зависимости пороговых плотностей энергии микросекундного лазерного импульса от: А - температуры плавления модифицирующего оксида, Б - твердости оксида.

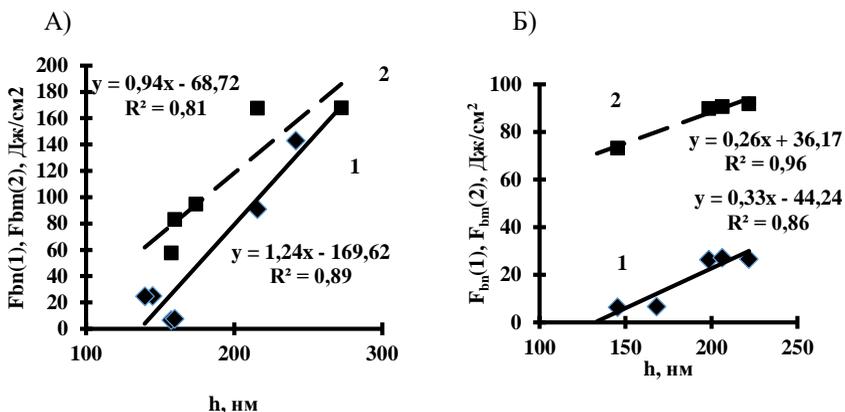


Рисунок 9 – Зависимость пороговых плотностей энергии нано- и микросекундного лазерных импульсов от толщины покрытия. А- хлоридные, Б- нитратные системы

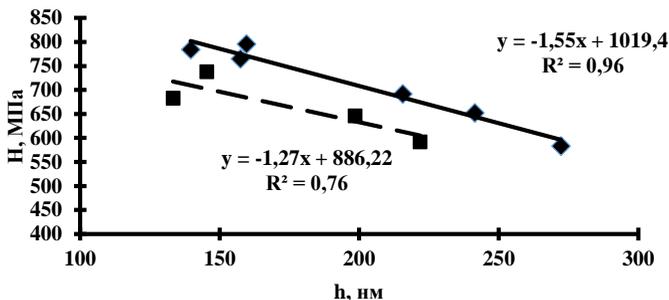


Рисунок 10 – Зависимость микротвердости композита от толщины покрытия.
 Верхняя прямая - однослойный, нижняя прямая - двухслойный композит.
 Скорость нанесения 3,8 мм/с.

Основные выводы по подразделу

1. В одно- и двухслойных покрытиях пороговые плотности энергии нано- и микросекундного лазерного импульсов понижаются с ростом микротвердости покрытия;
2. Пороговая плотность энергии микросекундного лазерного импульса понижается с ростом температуры плавления и растет с увеличением микротвердости по Виккерсу модифицирующего оксида
3. Пороговые плотности энергии увеличиваются с ростом толщины покрытия;

4. Микротвердость композитов снижается с увеличением толщины покрытия.

Фотокаталитическая активность композитов с золь-гель покрытиями

Фотокаталитическая активность образцов оценивалась по изменению концентрации метиленового синего (ISO 10678:2010(E)), которая определялась с помощью двулучевого спектрофотометра «ПЭ-6100» (Промэколаб) и стеклянных кювет с оптической толщиной 10 мм на длине волны 664 нм. Образцы помещались в стаканы объемом 50 мл, в которые приливалось по 15 мл водного раствора метиленового синего с концентрацией 3 мкмоль/л. Стаканы закрывались полиэтиленовой пленкой (прозрачна в УФ-диапазоне) для предотвращения испарения раствора и выдерживались в течение 24 ч в темном месте для установления адсорбционного равновесия. После, производилось облучение под УФ- лампой (TL-D 36W 08 BLB 1PP, 1,0 мВт/см², максимум излучения на 360 нм) в течение 5 и 10 ч с перемешиванием раствора.

Оценка фотокаталитической активности (ED_{MB} , мкмоль/(см²ч)) вычислялась по формуле

$$ED_{MB} = (V_0 \cdot (D_0 - D_t)) / (S \cdot t \cdot \varepsilon \cdot l), \quad (4)$$

где D_0 , D_t – значения оптической плотности растворов метиленового синего перед облучением и после облучения в течение t , ч соответственно, S – площадь покрытия, см², ε – коэффициент экстинкции метиленового синего на длине волны 664 нм, 0,07403 см³/(мкмоль·см), l – оптическая толщина раствора, см, V_0 – начальный объем раствора, см³. Полученные данные по ED_{MB} в интервалах 0-5 ч, 0-10 ч и 5-10 ч облучения были усреднены.

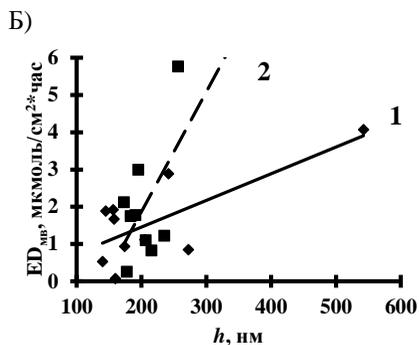
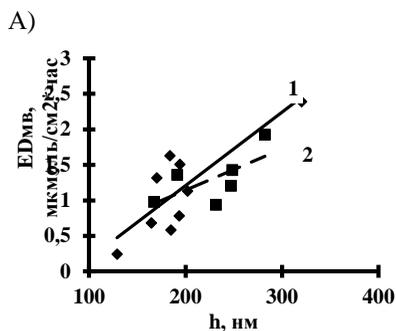


Рисунок 11 – Графики зависимости фотокаталитической активности (ED_{MV}) композитов от толщины покрытия h при скоростях нанесения 1- 3,8; 2- 5,8 мм/с. Прекурсоры: А- нитраты и азотная кислота, Б-хлориды и соляная кислота.

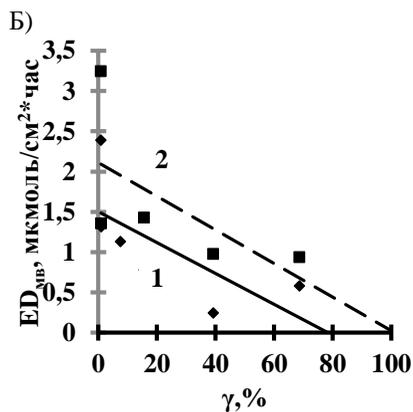
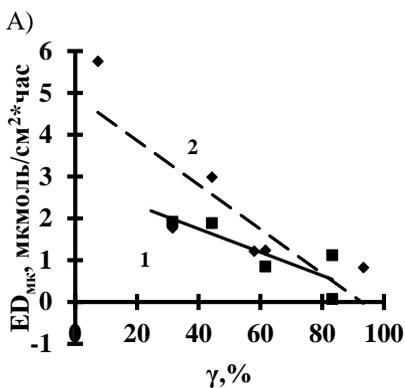
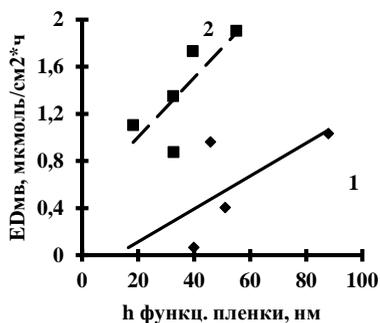


Рисунок 12 – Графики зависимости фотокаталитической активности (ED_{MV}) композитов от плотности упаковки частиц в слой γ при скоростях нанесения 1- 3,8; 2- 5,8 мм/с. Прекурсоры: А- нитраты и азотная кислота, Б-хлориды и соляная кислота.

А)



Б)

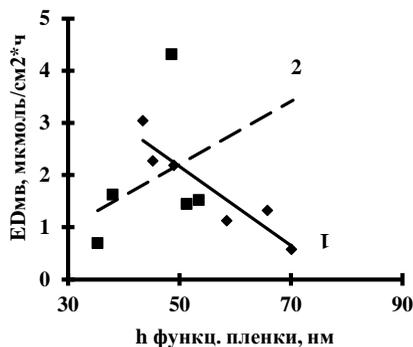
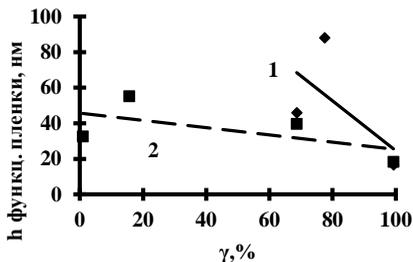


Рисунок 13 – Взаимосвязь между толщиной h функционального покрытия и фотокаталитической активностью двухслойных композитов. А – нитратные, Б – хлоридные системы. Скорость нанесения: 1- 3,8; 2- 5,8 мм/с

А)



Б)

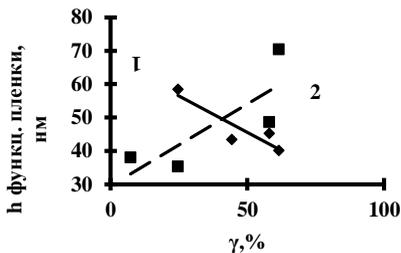


Рисунок 14 – Взаимосвязь между толщиной функционального покрытия h и плотностью упаковки частиц дисперсной фазы в слой γ . А – нитратные, Б – хлоридные системы. Скорость нанесения: 1- 3,8; 2- 5,8 мм/с.

Основные выводы по подразделу

- толщина однослойных покрытий и фотокаталитическая активность композитов изменяются однонаправленно;
- фотокаталитическая активность композитов повышается с уменьшением плотности упаковки частиц дисперсной фазы в слой покрытий.
- для композитов с двухслойными покрытиями (барьерный слой SiO_2 + функциональное покрытие) получены идентичные зависимости

фотокаталитической активности от толщины и плотности упаковки частиц в слой.

Многослойные композиты [26-28].

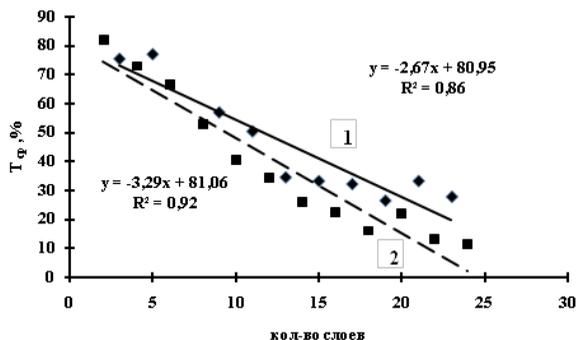
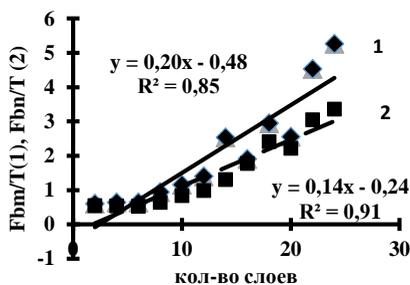


Рисунок 15 – Графики зависимости светопропускания композитов от числа слоев: 1 – 23, 2 – 24 слоя

а)



б)

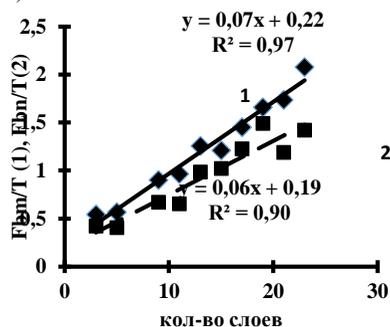


Рисунок 16 – Графики отношения пороговых энергий микро (1) и наносекундного лазерного импульса от светопропускания композитов и числа слоев: а- 24, б- 23 слоя

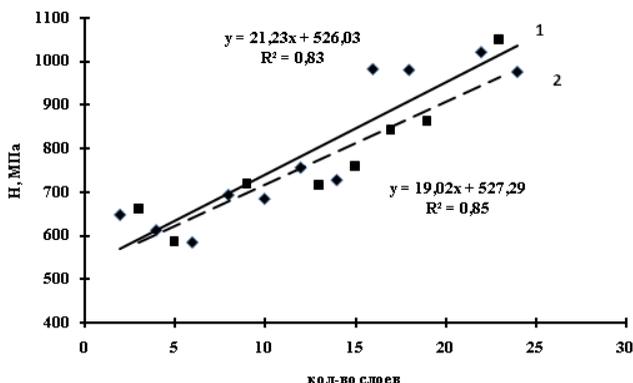


Рисунок 17 – Графики зависимости микротвердости композитов от числа слоев: 1- 24, 2 – 23 слоя

Основные выводы по подразделу

1. С увеличением количества слоев светопропускание композитов снижается, что может быть связано с усилением отражения и (или) рассеивания материала покрытия;

2. Обнаружена надежная взаимосвязь между пороговыми энергиями лазерного абляционного разрушения и светопропусканием композитов;

3. Микротвердость композитов повышается с увеличением количества слоев, что может объясняться достаточно высокой микротвердостью по Виккерсу материалов, составляющих слои, 7 – SiO₂ и 5,5-6,5 - TiO₂ (в зависимости от кристаллической формы).

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-43-09049 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Шеманин В.Г., Аткарская А.Б. Зависимость оптических свойств композитов с наноразмерными оксидными покрытиями от свойств пленкообразующих зольей. Часть 1. Влияние оксидного состава зольей // Журнал технической физики. 2014.Т.84. №10. С. 95-99.
2. Shemanin V.G. and Atkarskaya A.B. Optical Properties of Composites with Nanodimensional Oxide Coatings versus the Properties of Film_Forming

- Sols. I. The Influence of Sol's Oxide Composition // Technical Physics, 2014. Vol. 59. No. 10.-Pp. 1514–1518.
3. Шеманин В.Г., Аткарская А.Б. Зависимость оптических свойств композитов с наноразмерными оксидными покрытиями от свойств пленкообразующих золей. II. Влияние компонентного состава золя // ЖТФ, 2015. Т. 85. вып. 7. С. 107-111.
 4. Atkarskaya A.B, Nartzev V.M., Privalov V.E., and Shemanin V.G. Optical Properties of the Glass Composites with Nano Dimensional Films Dependence on the Sol Disperse Phase Characteristics Studies // Optical Memory and Neural Networks, 2017. Vol. 26. No. 1. Pp. 34–39.
 5. Atkarskaya A.B., Privalov V.E., and Shemanin V.G. The Nano Dimensional Silica Oxide Films Optical Properties Changing by the D-Elements Modification // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2015. Vol. 24. No. 3. Pp. 194–198.
 6. Аткарская А.Б., Евтушенко Е.И., Нарцев В.М., Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Оптические свойства стеклянных композитов с наноразмерными покрытиями в зависимости от дисперсной фазы золя // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2015. № 1(213). С. 136–144.
 7. Atkarskaya A.B Yevtushenko., E.I., Nartzev V.M., Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. Optical properties of the glass composites with nanofilms: the relationship to the dispersed phase of sol // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics, 2015. Volume 1. Issue 1. Pages 1-10.
 8. Аткарская А.Б., Каунов В.С., Нарцев В.М., Шеманин В.Г. Влияние природы прекурсоров на оптические характеристики стеклянных композитов с золь-гель покрытиями // 24 международная научная конференция. Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте. 12-17 сентября 2016 г., Новороссийск. С.89.
 9. Atkarskaya A.B., Nartzev V.M., Privalov V.E, Shemanin V.G. Optical Properties of the Glass Composites with Nano Dimensional Films Dependence on the Sol Disperse Phase Characteristics Studies // Optical Memory and Neural Networks, 2016., Vol. 25. No. 4. Pp. 294–297.
 10. Kaunov V.S., Charity P.V., Nartsev V.M., Shemanin V.G. Zakalova E.Yu., A.B. Atkarskaya. The sols parameters influence on the optical properties of nanocomposites // XXXI International Conference on Equations of State for Matter. March 1-6, 2016. Elbrus, Russia. Moscow, Chernogolovka, Nalchic.-p. 258.
 11. Аткарская А.Б, Нарцев В.М, Чартий П.В. Зависимость свойств стеклянных композитов с золь-гель покрытиями от параметров золя // Двадцать третья международная научная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте-15» 7-11 сентября 2015, Новороссийск ГМУ им. Адмирала

- Ф.Ф. Ушакова, 2015. С. 96.
12. Shemanin V.G. and Atkarskaya A.B. Dependence of Optical Properties of Composite Materials with Nanosize Oxide Coatings on the Properties of Film Forming Sols: II. Effect of the Sol Component Concentration // *Technical Physics*, 2015. Vol. 60. No. 7. Pp. 1051–1055.
 13. Аткарская А.Б., Закалова Е.Ю., Каунов В.С., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Влияние основных характеристик пленкообразующего золя на микротвердость покрытий // Двадцать третья международная научная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте-15» 7-11 сентября 2015 Новороссийск ГМУ им. Адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2015. С. 97.
 14. Atkarskaya V., D'yachenko V.V., Nartsev V.M., and Shemanin V.G. Microhardness and Refractive Index of Titanium Dioxide-Based Binary Coatings // *Technical Physics*, 2017. Vol. 62. No. 1. Pp. 97-100.
 15. Atkarskaya A.B., Zakalova E.Yu., Kaunov V.S., Nartsev V.M., Chartist P.V. and Shemanin V.G. Study of optical and mechanical strengths of the glass composites with sol-gel films // *Journal of Physics: Conference Series*, volume 774 (2016) (012120)
 16. Atkarskaya V., Privalov V.E., and Shemanin V.G. The Influence of the Silicon Dioxide Barrier Films on the Laser Ablation Destruction of the Glass Composites with the Films Drown from the Sols // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2016, Vol. 25. No. 1. Pp. 45–49.
 17. Аткарская А.Б., Каунов В.С., Нарцев В.М., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Зависимость устойчивости стеклянных композитов с наноразмерными золь-гель покрытиями к лазерному абляционному разрушению от наличия барьерного слоя // XI Международная конференция «Прикладная оптика -2016», Санкт-Петербург. 14-18 ноября 2016. С 43.
 18. Shemanin V.G. Atkarskaya A.B, Mkrtychev O.V., Privalov V.E. The glass nano-composites laser ablation destruction studies // XXIX International Conference on Equations of State for Matter. March 1-6, 2014, Elbrus, Russia. Book of Abstracts. Moscow & Chernogolovka & Nalchik. 2014. P.129-130.
 19. Аткарская А.Б., Мкртычев О.В., Шеманин В.Г. Оптическая прочность стеклянных нанокомпозитов // XXII Международной Конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте- 2014». 8-12 сентября 2014. Новороссийск. С.49.
 20. Шеманин В.Г., Аткарская А.Б. Лазерное абляционное разрушение стеклянных композитов с наноразмерным покрытием TiO_2 // *Журнал технической физики*, 2016. Том 86. вып. 2. С. 140-142
 21. Alla B. Atkarskaya, Oleg V. Mkrtychev, Vadim E. Privalov and Valery G. Shemanin. Laser Ablation of the Glass Nanocomposites Studies // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*» 2014. Vol. 23. No. 4.

- pp. 265–270.
22. Аткарская А.Б., Каунов В.С., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Лазерная абляция нанокомпозитов сложного состава // XXII Международной конференции Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте 2014. 8-12 сентября 2014. Новороссийск. С.50.
 23. Аткарская А.Б., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Лазерное абляционное разрушение стеклянных композитов с золь-гель покрытиями // XXII Международная Конференция Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте 2014. 8-12 сентября 2014. Новороссийск. С.51.
 24. Шеманин В.Г., Аткарская А.Б. Лазерное абляционное разрушение стеклянных композитов с наноразмерным покрытием TiO_2 // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 2. С. 140-142.
 25. Atkarskaya A., Zakalova E.Yu, Kaunov V.S., Nartsev V.M., Charity P.V., Shemanin V.G. The optical strength of the glass composite with sol-gel nanofilms // XXXI International Conference on Equations of State for Matter. March 1-6, 2016, Elbrus, Russia. Moscow, Chernogolovka, Nalchic.- P. 257
 26. Atkarskaya A., Privalov V.E., and Shemanin V.G. Multilayered Glass Composites Light Transmission Studies // Optical Memory and Neural Networks, 2016. Vol. 25. No. 4. Pp. 268–271.
 27. Аткарская А.Б., Закалова Е.Ю., Шеманин В.Г. Зависимость свойств композитов с наноразмерными покрытиями от взаимодействия компонентов в переходном слое пленка-подложка // 24 международная научная конференция. Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте. 12-17 сентября 2016 г., Новороссийск. С.90.
 28. Аткарская А.Б., Нарцев В.М., Прохоренков Д.С., Шеманин В.Г. Влияние диффузии натрия на из стеклянной подложки на оптические свойства композитов // Оптический журнал. 2016. №7. С. 15-19.

УРАВНЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВАЛКОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

v.bogdanov1947@gmail.com

**Богданов В.С., д-р. техн. наук, проф.,
Фадин Ю.М., канд. техн. наук, проф.,
Латышев С.С., канд. техн. наук, доц.,
Юдин К.А., канд. техн. наук, доц.,
Гавриленко А.В., ассистент,
Авдеев Я.А., инженер**

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

Аннотация. В статье описан процесс измельчения материала в горизонтальной валковой мельнице, выведена формула для определения кинетики горизонтальной валковой мельницы, зависящая от массы крупного класса, поступающего на измельчение от угловой скорости барабана, времени, необходимого для измельчения материала, с учетом кратности циркуляции. Получена зависимость массы крупного класса в разгрузке мельницы от кратности циркуляции, для частиц материалов рассеянных на ситах +0,074 мм и +0,15 мм. Полученные уравнения позволяют осуществлять расчет производительности мельницы и нагрузок.

Ключевые слова: горизонтальная валковая мельница, кинетика процессе измельчения, крупный класс материала, остаток на сите.

Механическое измельчение твердых тел с целью их дальнейшей технологической переработки является одним из самых распространенных в промышленности процессов. Исследование механики измельчения, физического состояния и физико-химических свойств измельченных материалов вызваны запросами практики и цель которых заключается в повышении эффективности технологических процессов. В зависимости от природы материала и характера его использования к измельчению предъявляют разнообразные, но, чаще всего, вполне конкретные требования по дисперсности, чистоте и другие [12,15,16]. В большинстве случаев ставится задача получения более тонких материалов при ограничениях в затратах энергии и времени. Эти же требования предъявляются и к горизонтальной валковой мельнице [3, 4, 6, 7, 8].

Для подбора условий оптимальной работы горизонтальной валковой мельницы и эффективного управления процессом измельчения в ней, необходимо знать, как протекает данный процесс во времени, то есть знать уравнение кинетики процесса измельчения.

Под кинетикой процесса измельчения понимают закономерный характер убывания количества крупного класса в измельченном материале в зависимости от времени измельчения [12, 11].

Эта зависимость имеет общую для всех материалов форму гиперболической кривой, что указывает на существование устойчивой связи между количеством недоизмельченного материала и времени измельчения. Вид кривых зависит от свойств измельчаемого материала и условий измельчения. Поэтому исследование кривых является основой изучения кинетики процесса измельчения в горизонтальной валковой мельнице.

Закономерность процесса измельчения установлена уже давно. За все время исследований процесса измельчения в мельницах периодического действия, учеными Э.В. Девидсом, А.Г. Тунцовым, М.К. Широкинским, А.М. Загустиным, В.В. Товаровым, В.П. Ромадиным, С.Ф. Шинкоренко, К.А. Разумовым, В.А. Перовым, Л.П. Шуповым, В.А. Олевским были предложены несколько вариантов расчета уравнения кинетики [1, 5, 9], учитывающие те или иные параметры и условия процесса измельчения, а также требования к точности расчета.

Наиболее простым и удобным при описании процесса измельчения, является уравнение, предложенное А. М. Загустиным [5, 1], в основу которого принято предположение о том, что скорость уменьшения остатка на контрольном сите пропорциональна массе этого остатка [11, 2]:

$$\frac{dR}{dt} = -kR, \quad (1)$$

где R – масса остатка крупного класса в момент t ;

t – продолжительность измельчения, мин.

K – постоянный коэффициент, коэффициент пропорциональности, зависящий от условий измельчения, относительная скорость

измельчения $kR = -\frac{dR}{Rdt}$.

Разделив переменные и проинтегрировав уравнение $S_H = 6D^2$, получим [2]:

$$\int \frac{dR}{R} = -k \int dt + C, \quad (2)$$

Откуда

$$\ln R = -kt + C, \quad (3)$$

Постоянная C определяется из начальных условий. В начальный момент времени при $t = 0$ масса крупного класса $R = R_0$. Следовательно,

$$C = \ln R_0, \quad (4)$$

и

$$\ln R = -kt + \ln R_0, \quad (5)$$

откуда

$$R = R_0 e^{-kt}, \quad (6)$$

где R_0 – масса крупного класса, поступающего на измельчение.

Массу крупного класса R можно выразить также в процентах $R_0 = 100\%$, от массы крупного класса в исходном материале.

Тогда уравнение примет вид [2]:

$$y = \frac{R}{R_0} 100 = 100 e^{-kt}. \quad (7)$$

Однако опытная проверка этих уравнений 6, 7, показала, что кинетика измельчения не всегда следует им. Поэтому В.В. Товаровым [1] было предложено другое экспоненциально-степенное уравнение кинетики измельчения вида:

$$R = R_0 e^{-kt^m}, \quad (8)$$

которое лучше описывает опытные кривые, полученные при разных продолжительностях измельчения.

Уравнение 6 без степенного показателя m можно рассматривать как частный случай уравнения 8 при $m = 1$.

Уравнение 8 также имеет недостаток, который выражается в том, что оно теряет физический смысл при граничных условиях, так как скорость измельчения должна иметь конечную величину в начале процесса измельчения и в конце. Поэтому уравнение кинетики 8 нужно рассматривать как эмпирическое уравнение, пригодное для описания процесса измельчения в определенных пределах.

Наиболее подходящее уравнение кинетики, имеющее физический смысл при граничных условиях, которое можно взять за основу для вывода уравнения кинетики горизонтальной валковой мельницы, предложил В.А. Перов, он предположил, что необходимо принять

переменной относительную скорость измельчения k , которая принята постоянной в уравнении 7 [10]:

$$\frac{dR}{dt} = -k_0 n R, \quad (9)$$

где k_0 – относительная скорость измельчения в начальный момент времени при остатке R_0 (постоянная величина);

$$n = \frac{k}{k_0}, \quad (10)$$

т.е. отношение скорости измельчения в данный момент времени k к скорости измельчения в начальный момент k_0 .

Он принял, что pk_0 будет относительная скорость измельчения в момент, когда остатка не будет, т.е. при $R = 0$. В пределах остатка R_0 до $R = 0$ он принял, что относительная скорость измельчения изменяется по прямолинейной зависимости.

Тогда [2]:

$$pk_0 + \frac{k_0 - pk_0}{R_0} R, \quad (11)$$

а

$$n = \frac{pk_0 + k_0(1-p) \frac{R}{R_0}}{k_0}. \quad (12)$$

Уравнение 9 можно записать в следующем виде [4]:

$$\frac{dR}{dt} = -k_0 \left[p + (1-p) \frac{R}{R_0} \right] R. \quad (13)$$

После интегрирования от R_0 до R и решения уравнения относительно R он получил [2]:

$$R = \frac{pR_0}{e^{pk_0 t} - 1 + p}. \quad (14)$$

Преимущества этого уравнения заключается в том, что оно хорошо описывает опытные результаты. Параметры p и k_0 находят по двум опытам: для решения системы уравнений удобно принять продолжительность измельчения во втором опыте в 2 раза больше, чем в первом, т.е. R_1 при t_1 и R_2 при $2t_1$ [2]:

$$p = \frac{R_0 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{2}{R_1} \right) + 1}{\left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right)}, \quad (15)$$

и

$$k_0 = \frac{\lg \left(\frac{pR_0}{R_1} + 1 - p \right)}{pt_1 \lg e}. \quad (16)$$

Формулу 14 будем использовать для синтезирования уравнения кинетики горизонтальной валковой мельницы. Для этого в нее необходимо внести некоторые соответствующие преобразования. Они заключаются в том, чтобы вместо времени измельчения, как это необходимо в трубной мельнице периодического измельчения, внести в эту формулу зависимость от кратности циркуляции z и частоты вращения ω барабана мельницы. Для этого необходимо вычислить время нахождения материала в мельнице в зависимости от этих параметров.

Для последующих расчетов необходимо принять, что барабан мельницы вращается по закону равномерного вращательного движения, то есть угловая скорость барабана не изменяется во времени.

Применяя известные законы для равномерного вращательного движения барабана, угловая скорость будет постоянна и равна [13]:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = const. \quad (17)$$

Угол, на который поворачивается мельница, равен:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t. \quad (18)$$

Примем за начало отсчета момент, при котором материал поступает в отклоняющее устройство мельницы, при этом $\varphi_0 = 0$ и $t = 0$.

Угол, на который повернется материал в мельнице за один оборот (период), равен $\varphi_T = 2\pi$. Суммарный угол на который повернется барабан вместе с материалом за один цикл измельчения:

$$\varphi_\Sigma = \sum_{i=1}^{n_{nl}} \varphi_T = n_{nl} \varphi_T = n_{nl} 2\pi, \quad (19)$$

где n_{nl} – количество направляющих пластин в отклоняющем устройстве, шт.

Время, необходимое для прохождения материалом одного цикла измельчения:

$$t_0 = \frac{\varphi_{\Sigma}}{\omega}, \quad (20)$$

или

$$t_0 = \frac{n_{nl} 2\pi}{\omega}. \quad (21)$$

Время, необходимое для измельчения материала, с учетом кратности циркуляции (то есть количества повторных циклов измельчения):

$$t_j = t_0 \cdot z_j = \frac{n_{nl} 2\pi}{\omega} z_j, \quad (22)$$

где z_j – кратность циркуляции, шт.

Учитывая вышеизложенное можно вывести формулу уравнения кинетики горизонтальной валковой мельницы, подставив в формулу 14 выражение для определения времени из формулы 22:

$$R = \frac{pR_0}{e^{pk_0 t_0 z} - 1 + p}. \quad (23)$$

Параметры p и k_0 соответственно также находят по двум опытам: но теперь, при постоянной угловой скорости, изменению подвергается кратность циркуляции, для решения системы уравнений удобно принять кратности циркуляции первого и второго опыта, т.е. R_1 при $z_1 = 1$ и R_2 при $z_2 = 2$:

Расчет параметра p не претерпевает никаких изменений, он находится по той же формуле:

$$p = \frac{R_0 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{2}{R_1} \right) + 1}{\left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right)^2}. \quad (24)$$

Параметр k_0 находят путем введения в формулу 16 выражения для определения времени из формулы 22 при $z_1 = 1$, после чего формула для k_0 будет иметь следующий вид:

$$k_0 = \frac{\lg\left(\frac{pR_0}{R_1} + 1 - p\right)}{pt_0 \lg e}. \quad (25)$$

Формулу 23 можно преобразовать, для этого в неё необходимо ввести вместо k_0 выражение 25:

$$R = \frac{pR_0}{e^{\frac{\lg\left(\frac{pR_0}{R_1} + 1 - p\right)}{pt_0 \lg e} - t_0 z} - 1 + p}. \quad (26)$$

После необходимых преобразований сначала получаем:

$$R = \frac{pR_0}{e^{z \ln\left(\frac{pR_0}{R_1} + 1 - p\right)} - 1 + p}. \quad (27)$$

А затем выражение можно преобразовать к следующему виду:

$$R = \frac{pR_0}{\left(\frac{pR_0}{R_1} + 1 - p\right)^z - 1 + p}. \quad (28)$$

Из полученной формулы можно сделать выводы: в расчетах с применением формулы 28 отпадает необходимость в нахождении параметра k_0 , а также можно заметить отсутствие в расчетах параметров ω и $n_{пл}$.

Таким образом, для расчетов уравнения кинетики горизонтальной валковой мельницы необходимо пользоваться всего двумя формулами: для нахождения параметра p формулой 24 и уравнением кинетики, формулой 28.

На основании уравнения 28 были построены зависимости массы крупного класса в разгрузке мельницы от кратности циркуляции, представленные на рисунке 1.

Параметр p для каждого из графиков был рассчитан на основании поисковых экспериментов по двум опытам: при постоянной угловой скорости, изменению подвергается кратность циркуляции, для решения уравнений удобно принять кратность циркуляции первого и второго опыта, т.е. R_1 при $z_1 = 1$ и R_2 при $z_2 = 2$.

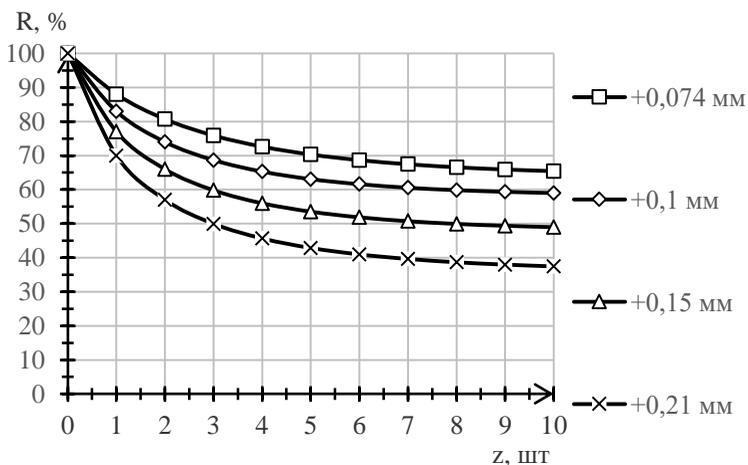


Рисунок 1 – Зависимость массы крупного класса в разгрузке мельницы от кратности циркуляции, для частиц материалов, рассеянных на ситах:

+0,074 мм ($R_1=88\%$, $R_2=80\%$); +0,1 мм ($R_1=83\%$, $R_2=74\%$);

+0,15 мм ($R_1=77\%$, $R_2=66\%$); +0,21 мм ($R_1=70\%$, $R_2=57\%$).

Найденное уравнение кинетики измельчения дает возможность обосновать ряд практически важных вопросов, таких как расчет производительности мельницы или определение циркулирующей нагрузки и др.

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

Список литературы:

1. Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. М.: Metallurgizdat, 1959. 427 с.
2. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 415 с.
3. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Романенко В.С., Богданов Д.В., Василенко О.С., Гавриленко А.В. Расчет потребляемой мощности и производительности горизонтальной валковой мельницы // Строительные и дорожные машины. 2016. №11. С. 11-16.

4. Богданов В.С., Фадин Ю.М. Конструкции среднеходных барабанно-валковых мельниц / Интерстроймех-2016: сб. докладов XX Междунар. науч.-техн. конф. // М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2016. С. 78-85.
5. Богданов О.С., Олевский В.А., Акиншин И.К., Башенко Н.Т. Справочник по обогащению руд: подготовительные процессы. М.: Недра, 1982. 367 с.
6. Еремченко С.М., Кузнецов Д.В., Фадин Ю.М., Герасименко В.Б., Романенко В.С. Производительность горизонтальной валковой мельницы // Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докладов IX Междунар. науч.-практ. конф., студентов, аспирантов и молодых ученых., Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2016. Т.1. С. 24-26.
7. Еремченко С.М., Трубаева В.А., Богданов В.С., Латышев С.С., Романенко В.С. Конструкция горизонтальной валковой мельницы Nогоmill // Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докладов IX междунар. науч.-практ. конф., студентов, аспирантов и молодых ученых., Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2016. Т.1. С. 27-30.
8. Еремченко С.М., Яценко И.А., Богданов В.С., Фадин Ю.М., Романенко В.С. Горизонтальная валковая мельница // Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докладов IX междунар. науч.-практ. конф., студентов, аспирантов и молодых ученых, Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2016. Т.1. С. 31-34.
9. Непомнящий Е. А. Кинетика измельчения // Теоретические основы химической технологии. 1977. т.11. №3. С. 477–480.
10. Разумов, К.А. Перов В.А., Зверевич В.В. Новое уравнение кинетики измельчения и анализ работы мельницы в замкнутом цикле // Цветная металлургия. 1969. №3. С. 3–15.
11. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: Учебник для вузов. М.: Недра, 1985. 285 с.
12. Фадин Ю.М, Герасименко В.Б., Романенко В.С., Еремченко С.М. Анализ результатов исследований зависимости тонкости помола от основных факторов горизонтальной валковой мельницы / Научные технологии и инновации: Междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 2016. Ч. 4. С. 225-231.
13. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. М.: Наука, 1964. 848 с.
14. Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Vasilenko O.S. Ball mill power calculation with inclined partition // IPT Scientific Publishers. 2016. Т. 8. N. 3. С. 19031-19041.
15. Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Vasilenko O.S. Determination of cement production sludge filtration properties // IPT Scientific Publishers. 2016. Т. 8. N. 3. С. 18169-18178.
16. Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Latyshev S.S., Bogdanov D.V., Bogdanov N.E. Calculation of technological parameters for sludge spiral-screw classifiers // IPT Scientific Publishers. 2016. Т. 8. N. 4. С. 22662-22672.

ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ СОЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ Г. БЕЛГОРОДА*

andreybolsh@yandex.ru

¹Большаков А.Г., д-р арх., проф.,

²Лоншаков Д.А., ассистент

¹*Иркутский государственный технический университет*

²*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Физическое пространство города влияет на социальную эффективность городского сообщества. Внутри частных вместилищ – домов, кварталов, учреждений и предприятий, в местах отдыха, а также вовне, на улицах – происходит циркуляция движения горожан. Она и является так называемой жизнью города. Самый узкий круг ежедневных вращений – место жилья - место работы - место жилья. Однако цикл может быть более сложным и насыщенным, включать в себя неспецифические виды деятельности. Так чтобы повысить эффективность деятельности горожан (как в совокупности так и по отдельности) необходимо упорядочение городского пространства. Изучением такого порядка и занимается топология.

Проблема состоит в том, что не смотря на развитую систему управления развитием территории (правовая база, административные органы, профессионального сообщества, развитый девелопмент) не хватает объемного видения проблем развития города. Необходимо выявлять закономерности и разрабатывать принципы, которые позволяют градостроительную политику сделать реальной и социально эффективной. С этой целью и проведена работа по анализу топологической структуры города Белгорода.

Ключевые слова: общая топология города, социальная эффективность планировки, морфология застройки, зеленый каркас города, жизнестойкость городского пространства, конфигурация уличной сети, градостроительные мотивации

Введение

Научная проблема данного исследования заключается в том, что физическое пространство города, как в территориальном измерении, так и в поле действий горожан влияет на социальную эффективность

городского сообщества. То есть на его социальное воспроизводство: демографический рост города, развитие условий проживания, возможности образования детей и молодежи, обеспечение занятости в коммерческой и социальной сфере.

Совокупность действий горожан и их социальных групп должны получить пространственную форму, с точки зрения частных аспектов деятельности: проживания, обслуживания, общения, персонального или семейного обособления, работы, учебы, отдыха. Эта пространственная форма должна быть эффективной как ресурс и условие, чтобы деятельность привела к социально значимым результатам: повышению коммерческого потенциала, уровня публичности общественных мест и повышение конфиденциальности мест частных. А также эта деятельность и ее пространственная организация не должны разрушать природу и противоречить культуре градоустройства.

Белгород в целом, как город, успешен в выборке крупных городов России. Об этом говорит прирост населения, развитие жилого фонда, развитие сети центральных мест, школ, университетов, коммерческой деятельности. Есть рекреационные, общественные пространства, развивается сеть улиц. Мозаика пространственной организации мест Белгорода растет по пятну и совершенствуется по балансу и устройству. Однако каковы закономерности этого устройства и какими принципами надо руководствоваться в дальнейшем пространственном развитии города?

1. На примере Белгорода проведено исследование на понимание общей **топологии города**-понимания пространства города как физического пространства и закономерностей связи его с движением горожан в направлении обеспечения социального воспроизводства городского сообщества. Общую топологию города составляют:

а) система центральных мест: Город как система насыщен узлами, обладающими той или иной степенью центральности. Основной центр сформирован исторически и исходя из объективных причин – согласно условиям ландшафта. В Белгороде это Соборная площадь, она же главная административная площадь, расположилась в геометрическом центре исторического ядра в послевоенное время на месте бывшего женского монастыря. С переходом к стадии экспансивного развития город занимает новые площадки, таким образом формируются новые центры. Центральность условно соответствует двум критериям: доступности физической и по времени. Таким образом, центр чаще всего расположен в геометрическом центре пятна городской застройки. В Белгороде сложилась следующая

топологическая система центральных мест: 1) административная площадь, 2) Музейная площадь, 3) Иосафовский сквер с действующими храмами и ныне утраченным Троицким собором; 4) ярмарочный квартал и 5) вокзальная площадь с железнодорожным вокзалом – образуют крестообразное местоположение с центром на административной площади.

б) совокупность жилых градостроительных единиц. В первую очередь, город обеспечивает технологию жизнедеятельности. В пределах одного города такая технология, или другими словами, образ жизни, может заметно различаться. Не все образы жизни соответствуют занимаемому пространству города. Так к примеру, большой процент усадебной застройки снижает потенциал города как источника специфической деятельности, но в тоже время усадебная застройка, обладающая минимальной исторической аутентичностью, либо эстетической характеристикой придает городу другие положительные качества, такие как историческая и культурная ценность. Жилые образования собираются в группы – так называемые ячейки, выстраиваемые вокруг локальных центров. Все жилые единицы – наибольшая составляющая общей топологии города.

Для их изучения мы составили схему, выявляющую всю жилую застройку г. Белгорода, обладающую качеством репрезентативности, что в нашем случае означает наличием в среде простейших моделей городского сообщества. Разделив жилую застройку на фрагменты – ячейки, мы провели сравнительное ранжирование по 1) степени социальной насыщенности 2) степени непригодности территории. в) система внешних и внутренних порталов – переходов из внешнего пространства во внутригородское и мест перехода из крупных районов города друг в друга. г) сеть улиц. Конфигурация начертания уличной сети задает общее направления потоков городской жизни. Территория города уличной сетью делится на кварталы и планировочные районы. Взаимное расположение элементов в общей компоновочной схеме должно удовлетворять требованиям эффективности связей между частями города. Методами компоновки связей решаются два типа задач: 1) разбиения заданного контура на участки в определенном пространственном порядке; 2) объединения участков транспортными и пешеходными связями.

Районы Белгорода имеют разные типы конфигураций уличных сетей, или компоновки уличных связей: *Первый тип* – гипподамова сеть -территория разбита ортогональными улицами на кварталы правильной прямоугольной формы. Сеть улиц

образует Решетку (планировка исторического центра Белгорода). *Второй тип* - кварталы неправильной формы. Сеть улиц неправильной формы (4-ый Южный мкр. г. Белгород). Важным социально-пространственным свойством первых двух типов планировок является двор – замкнутое или полузамкнутое пространство, приватное, или полуприватное место, где созданы условия для формирования соседского сообщества.

Третий тип - дома могут выстраиваться в параллельные строчки внутри квартала и все придомовые пространства при этом – проходные. Двор при этом получается ущербным (микрорайон в улицах Садовая-Железнякова-Хмельницкого-Студенческая).

Четвертый тип-свободный. Характерен для микрорайонных идей 1960-х-1870-х годов. Микрорайон в такой версии имеет по существу одну объездную закольцованную (мкр. 2-ой Южный) или замкнутую в прямоугольник внешнюю рамку из улиц. Внутри такого квартала (микрорайона) связи тупиковые.

2. Топологические свойства городского пространства следующие.

А) градоформирующей деятельностью пространство фрагментируется на части: элементы города. Параллельно с фрагментацией возникает система связей между фрагментами, обеспечивающая целостность – дискретность и непрерывность в общенаучном понимании свойств пространства.

Б) Фрагментация связана с возникновением двух полюсов города: публичных мест и частных мест.

В) Уличная сеть подразделяется на улицы – артерии и капилляры, или улицы тупиковые. Артерии - по которым осуществляется преимущественно транзитное движение и такие улицы пересекают пятно города с одного конца на другой, как диаметр, или в решетчатой планировке как длиннейшие улицы равные длине прямоугольника пятна города. Тупиковые улицы контролируют вход в лабиринт отдельно взятой жилой градостроительной единицы.

Г) В топологии города фокусируется система центральных мест, с выявлением главной вершины сетевой иерархии – главного центра.

Д) Жилые градостроительные единицы развиваются как обособленные, дворовые ячейки которые должны быть частными – тупиковыми в аспекте связности.

Е) Свойство открытых публичных пространств - общая доступность их для всех горожан и привлекательность, оптимальная вместимость и плотность разнообразных центральных функций.

Ж) Свойство ландшафтообразности, Инвертируемость застроенных контуров с деревом долин, овражно-балочной сетью. Т.е. визуально дерево долин можно воспринимать как фигуру на фоне застроенной территории. А можно, наоборот, планировочные фрагменты застройки, ограниченные естественными рубежами, воспринимать как фигуры, вписанные в фон овражно-балочной сети.

3. Устойчивое развитие территории – такая форма урбанизации, которая в планировочном аспекте включает природный, функциональный, историко-культурный каркасы, сеть ячеек и центральных мест, обеспечивающие путем их параметризации такое развитие обитаемого пространства, в котором сохраняются природные и культурные ценности.

4. Высшей градостроительной ценностью обладает исторический центр – территория города, сложившегося к 1911 году, представляет собой решетку из шести широтных улиц и 6 меридиональных, спускающихся к реке Везелке. В составе территории находятся главные публичные пространства города: центральный рынок, театральная площадь, Иосафовский сквер перед восстановленным Марфо-Мариинским женским монастырем, главный Преображенский собор, Свято-Троицкий бульвар, символ державности и православия, Народный бульвар – главная торговая улица, музейная площадь.

5. Выявлены закономерности взаимного соответствия градостроительной ценности местоположений города, включая жилые градостроительные единицы и такие индикаторы социальной ценности объектов, как стоимость жилья и образовательный рейтинг средних общеобразовательных школ. Для анализа применен авторский метод соотнесения несоизмеренных рейтингов. Градостроительную ценность местоположений оценивали по насыщенности жилой застройки объектами социальной инфраструктуры, коммерческими центрами и связностью с центром. Стоимость жилья применялась согласно официальных справочников о рыночной стоимости квадратного метра жилой площади типовой застройки, чтобы исключить влияние архитектуры дома на цену квадратного метра. Рейтинги средних школ выстраивали по официальным данным департамента образования администрации города Белгорода. В результате оказалось, что при сравнении рейтингов районов с рейтингами цен жилья и рейтингом школ по образовательному уровню обнаруживается корреляция в пределах 65-80 %. Это свидетельствует о

закономерной связи: в хорошем районе высокой стоимости жилье и хорошие школы.

6. Для характеристики распределения интенсивности и траекторий пешеходного движения по улицам и переулкам Белгорода был использован топологический метод, сходный с методом интеграции школы пространственного синтаксиса Б. Хиллера, но имеющий авторскую методику. Метод проще для вычислений и графического отображения. Суть состоит в следующем. В анализируемом районе определяли точки локации и дестинации. Локациями – точками отправления служили жилые дома (в масштабе микрорайона) или жилые кварталы (в масштабе исторического центра). Дестинациями в микрорайоне были выбраны детские сады, школы, остановки общественного транспорта и здания – комплексы торговли и услуг. Пути движения прокладывали по имеющейся тропиночно-дорожной сети, по местным улицам. Для центра – по улицам, образующим решетку территории исторического центра. Была выявлена степень загруженности пешеходами ряда отрезков улиц, которые недоиспользуют потенциал своей интеграционной ценности. Они могут быть рекомендованы для размещения объектов сервиса и благоустройства. В пригородных поселках мотивацией расселения является приватность. Это достоверно установлено социальным опросом. В соответствии с этим определены условия расположения земельных участков в планировке поселка, включая расположение вблизи магистралей, в окружении соседей и в контакте с природным участком ландшафте, «хата с краю». Выявлены земельные участки в составе поселков, характеризующиеся максимальной приватностью, как социальной ценностью, полярной по отношению к публичности, которая отличает каменное ядро города. Ценность субурбии – приватность. Ценность плотного ядра города – публичность.

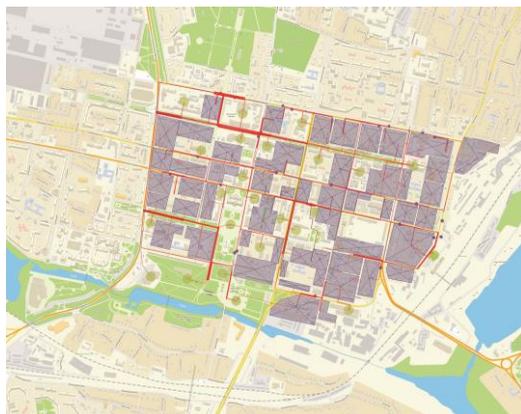


Рисунок 1 – Выявление интенсивности потоков движения пешеходов на отрезках уличной сети [Большаков, Лоншаков]

7. А) Между каменным ядром и пригородным поясом целесообразно сформировать **зеленый пояс** на основе оставшихся природных ландшафтов. С востока это долина Северского Донца. На западе слева от Везелки это территория за Чичериным логом, включая меловой карьер к западу от Белой горы. Далее к югу это полоса долины речки Гостянки. На северо-западе это водораздельная поверхность между улицей магистральной, юго-западным поселком пригородного пояса и федеральной дорогой М2 Москва – Симферополь. На юге это разрыв между улицей Ватутина и поселком Дубовое. А также фрагментарно сохранившиеся сельскохозяйственные поля, на юго-западе между микрорайоном Улитка, поселком Репное и ИЖС микрорайона Спутник.

Б) Общественное пространство отрезков улиц с максимальной пешеходной нагрузкой, выявленных в ходе анализа в центре, в жилых микрорайонах срединной зоны должны получить интенсивное благоустройство и насыщаться коммерческими объектами в первую очередь.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08051«р_офи_м».

Список литературы:

1. Статистический ежегодник. Белгородская область. 2012: Стат. сб./ Белгород: Белгородстат, 2012. 613 с.
2. Большаков А.Г., Социальная эффективность градостроительства // Жилищное строительство. 2016. № 1-2. С. 51-59.
3. Большаков А.Г., Лоншаков Д.А., Матвейшина М.Е., Щербакова Т.П., Бондарева В.Ю. Анализ социально-пространственных условий развития планировки Белгорода // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, РФФИ и правительством Белгородской области. 2015. С. 41-51.
4. Bill Hillier. A Theory of the City as Object. Or, how spatial laws mediate the social construction of urban space // Proceedings. 3rd International Space Syntax Symposium Atlanta 2001. pp.1-28
5. Bas Yener. Production of urban form as the reproduction of property relations morphogenesis of yenisehir – Ankara: Middle East Technical University.- Ph. D. thesis, Department of City and Regional Planning Supervisor: Assoc. Prof. Dr. BaykanGünay August, 2010, 256 pages. Режимдоступа: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12612423/index.pdf>
6. Большаков А.Г., Лоншаков Д.А. Повышение экологического благополучия района в Белгороде путем преобразования ООПТ в окружении застройки в парк с природоохранными функциями // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 47-52.

ГОРЮЧИЕ ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА

borisov@intbel.ru

Борисов И.Н., д-р. техн. наук, проф.,

Мишин Д.А., канд. техн. наук, доц.,

Головизнина Т.Е., канд. техн. наук, доц.,

Мандрикова О.С., канд. техн. наук

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

Аннотация. В работе рассмотрено влияние горючих техногенных отходов на физико-химические процессы производства цемента, а именно процессы обжига сырьевой смеси и измельчения клинкера, качество цемента, а также работу технологического оборудования. Установлено, что введение горючих отходов может увеличивать пылевывос из печи, уменьшать температуру возгонки сульфатов, осложняя процесс производства сульфодерритного и рядового клинкеров, интенсифицировать измельчение клинкера при определенной гранулометрии горючего отхода. Прочность цементного камня при введении 5-10% горючих отходов в сырьевую смесь достигает прочности рядового цементного камня в марочном возрасте.

Ключевые слова: техногенные отходы, выгорающие добавки, адгезионно-когезионные свойства, возгонка сульфатов, интенсификатор измельчения, прочность цементного камня.

Цементная промышленность России – это крупнейший потребитель топлива. Природное топливо, не восстанавливается, поэтому актуальным в настоящее время является его замена на отходы, что также решает экологические проблемы [1-3]. Цементная вращающаяся печь – самый подходящий агрегат по утилизации отходов, в том числе вредных для человека и окружающей среды. Так как в печи температура факела достигает 1800°C и время нахождения частиц в высокотемпературной области доходит до 10-15 с. Кроме этого оксид кальция, находящийся в пыли газового потока ингибирует образование опасных диоксинов.

Так как в России большинство заводов работают по мокрому способу, наиболее целесообразно техногенные отходы вводить в шлам в качестве выгорающей добавки, поскольку данный способ не требует

использования дополнительного оборудования. В работе рассмотрено влияние горючих техногенных отходов на физико-химические процессы производства цемента, а именно процессы обжига сырьевой смеси и измельчения клинкера, качество цемента, а также работу технологического оборудования.

Работа цементной вращающейся печи часто осложняется явлением пылеобразования [4]. В России превалирует мокрой способ производства цемента над сухим и комбинированным. Экономичность работы таких печи сильно зависит от оптимизации теплообменных устройств, являющихся основным источником пыли [5]. Поэтому при производстве цемента по мокрому способу весьма важным является изучения влияния выгорающих добавок на адгезионно-когезионные свойства шламов, которые определяют пылеобразование и эффективность теплообмена в зоне цепной завесы.

Процесс сушки шлама можно условно разделить на два этапа: от исходной до критической влажности, когда количество шлама, перешедшего на цепи, достигает максимума, и от критической влажности до влажности, когда происходит осыпание материала с цепей. Чем дольше цепи покрыты материалом, тем лучше теплообмен в печи, поскольку материал находится в потоке горячих отходящих газов, а также тем больше пыли, выносимой газовым потоком, улавливается в зоне цепной завесы [6]. Поэтому участок – до критической влажности – можно рассматривать как зону пылеулавливания, где шлам за счет избыточной влажности улавливает пылевидную фракцию. Второй участок, где шлам полностью теряет подвижность и постепенно пластичность, можно рассматривать как зону пылеобразования. Поток газов, движущихся во вращающейся печи, поднимает с поверхности материала отдельные частицы. Более крупные из поднятых частиц осаждаются по длине печи, остальные уносятся газами.

В качестве топливосодержащей добавки использовался лигнин, ввод которого в шлам в количестве 6% позволит снизить расход топлива на 35 кг на тонну клинкера. Изучение влияния лигнина на изменение адгезионно-когезионных свойств проводились на кричевском шламе на основе мела и новотроицком шламе на основе известняка. Введение лигнина в новотроицкий шлам изменило характер кривой высушивания шлама, увеличив массу шлама на цепях с 0,32 до 0,39 кг/кг и величину критической влажности с 30 до 32% (рис. 1). В результате уменьшился интервал влажности пылесажения, и значительно снизилась интенсивность осыпания материала с цепей. Добавка лигнина в кричевский шлам привела к тому, что характер

кривой изменился более существенно, увеличилось значение критической влажности с 28 до 37%, что привело к значительному сокращению зоны пылеосаждения и расширению зоны пылеобразования.

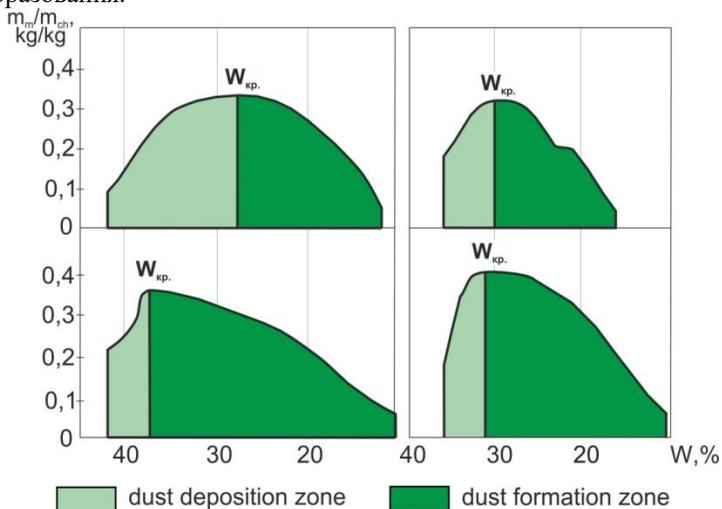


Рисунок 1 – Особенности влияния лигнина на изменение удельной массы шлама на цепях при высушивании: 1 – без добавки, 2 – с добавкой лигнина; слева – кричевский шлам, справа – новотроицкий

Таким образом, введение лигнина в шлам приводит к изменению характера кривой сушки шлама, а именно, уменьшается диапазон разности влажностей до критической и увеличивается диапазон разности влажностей после критической. У кричевского шлама с добавкой лигнина разность влажностей составляет 5 и 27 %, а у новотроицкого соответственно – 4% и 22%.

Независимо от компонентного состава сырьевого шлама (мел или известняк) лигнин увеличивает удельную массу материала на цепях, интенсифицирует массообмен, смещает критическую влажность в сторону увеличения влажности шлама, тем самым, сокращая зону пылеулавливания и увеличивая зону пылеобразования.

Таким образом, при использовании выгорающей добавки в шлам необходимо изучение его адгезионно-когезионных свойств с целью установления возможности пылеобразования в зоне сушки. Изменение характера поведения шлама на цепях в процессе сушки возможно благодаря изменению конструкции цепных завес.

Другим немаловажным показателем работы печи является степень циркуляции в ней щелочных сульфатов, приводящая к образованию сульфатных колец. Кроме того, постоянно развивающаяся промышленность требует производства новых видов цемента, обладающих специальными свойствами. Одним из наиболее перспективных является безусадочный цемент, получаемый с добавлением сульфоферритного клинкера. Сульфоферритный клинкер синтезируют на основе мела, ферритных и сульфатных компонентов, часто отходов, таким образом, чтобы при обжиге формировалась основная его фаза – сульфоферрит кальция [7-9].

Как известно, введение выгорающих добавок в сырьевую смесь может привести к появлению в печи восстановительной атмосферы, что может повлиять на температуру начала возгонки сульфатов. В случае производства сульфоферритного клинкера ранняя возгонка сульфатной фазы приведет не только к нарушению режима работы печи, но и к получению брака, поскольку клинкер не будет содержать сульфоферрит кальция, являющийся основной фазой. Поэтому необходимо изучить процесс возгонки оксида сульфата из сульфоферритного клинкера в присутствии выгорающей добавки.

Различие между температурами начала разложения сульфатов и улетучивания продуктов разложения в смеси, приготовленной для получения сульфоферритного клинкера, определяли с использованием комплексного термического анализа путем создания различных газовых сред: нейтральной, окислительной и восстановительной.

Для определения начала улетучивания SO_3 в нейтральной среде съемка термограмм осуществлялась в аргоне, для установления температуры, соответствующей началу возгонки сульфатов в окислительной среде, – на воздухе. Восстановительную среду создавали искусственно путем введения в сырьевую смесь 2% нефтяного кокса, выгорание которого приводило к изменению атмосферы с окислительной на восстановительную. Съемка осуществлялась на воздухе в закрытых платиновых тиглях.

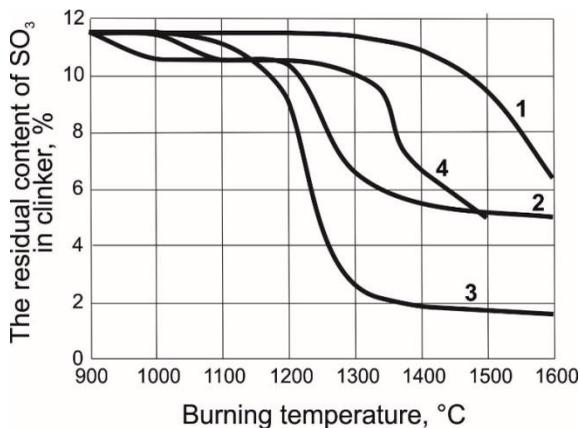


Рисунок 2 – Зависимость температуры начала возгонки SO_3 от газовой среды: 1 – окислительная, 2 – восстановительная, 3 – нейтральная, 4 – локальная восстановительная

Так, в нейтральной среде начало возгонки приходилось на 1050°C , в восстановительной среде – на 1200°C , в окислительной среде – на 1300°C .

В лабораторной печи, где преобладала окислительная среда, но, благодаря использованию выгорающей добавки имело место локальная восстановительная среда, возгонка начиналась также при 1300°C , но в сравнении с окислительной средой ее скорость значительно возростала (рис. 2).

Таким образом, при производстве сульфоферритного клинкера, а также и в случае получения рядового клинкера в присутствии выгорающей добавки необходимо контролировать атмосферу в печи, для управления процессом возгонки SO_3 , а именно, началом возгонки и ее скоростью.

Использование горючих техногенных отходов в производстве цемента благоприятно сказывается не только на расходе основного топлива, но и на электропотреблении цементной мельницы, поскольку позволяет получать более легкоразмалываемые клинкеры [5]. Использование нефтяного кокса в этом качестве тоже должно увеличить размалываемость. Кроме этого, нефтяной кокс состоит из углерода, поэтому его можно использовать и в качестве интенсификатора помола клинкера. Влияние углеродистых материалов на интенсификацию измельчения клинкера не является новым, но влияние фракционного состава добавок на этот процесс ранее изучен не был.

Исследование влияния нефтяного кокса на кинетику измельчения портландцементного клинкера проводили на заводском клинкере ЗАО «Белгородский цементный завод» химический состав, которого представлен в табл. 1. Содержание свободного CaO в клинкере составило 0,47%.

Таблица 1 – Химический состав заводского клинкера ЗАО «Белгородский цементный завод»

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
21,55	5,48	4,33	66,74	0,54	0,24	0,56	0,27	0,52

Изучение кинетики измельчения клинкера проводили в лабораторной мельнице объемом 1л. Масса шаровой загрузки в мельнице – 1,2 кг. Для исследования процессов, происходящих в мельнице, очень важна стабильность исходного гранулометрического материала. Поэтому, чтобы загружаемый в мельницу материал имел одинаковый гранулометрический состав, клинкер измельчали и классифицировали до получения следующих фракции: 1,25-0,315мм – 65% и 0,315-0 мм – 35%. После получения необходимого для помола фракционного состава, методом квартования отбиралось 6 навесок, к которым добавляли 5% природного гипса фракции 0,63 мм. Во время помола пробу материала отбирали через каждые 10 мин, проводили необходимые замеры и обратно возвращали в мельницу, после чего помол продолжали.

Эффективность нефтяного кокса как интенсификатора помола сильно зависит от его гранулометрического состава. Так при использовании фракции 0,08мм помол цемента в присутствии добавки замедляется. Для превышения скорости измельчения бездобавочного цемента концентрацию нефтяного кокса мелкой фракции пришлось увеличить с 0,5-1% до 1,5% (рис. 3). Причем в процессе измельчения цемента для мелкой фракции наблюдалась остановка изменения (индукционный период) удельной поверхности цемента при достижении Суд. ~ 250м²/кг. Для относительно крупной фракции 0,2-0,08мм такого индукционного периода не наблюдалось, и скорость измельчения цемента практически не изменялась и оставалась одинаковой для концентраций добавки 0,5-1,5%.

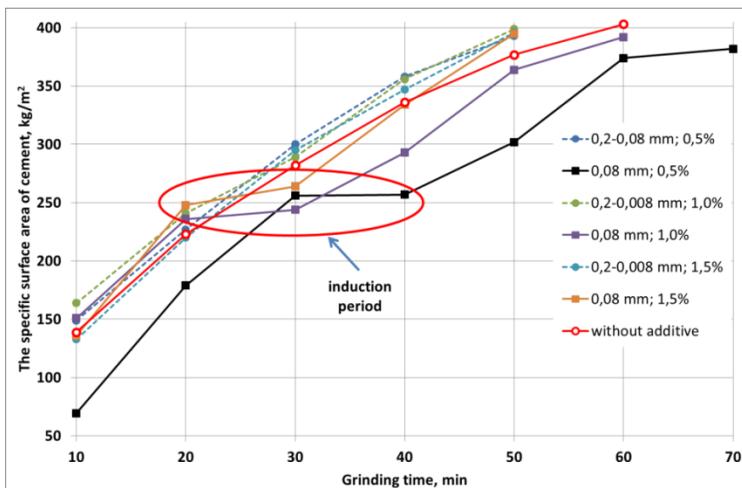


Рисунок 3 – Влияние гранулометрического состава нефтяного кокса и его концентрации на кинетику измельчения клинкера
ЗАО «Белгородский цементный завод»

Такое различие в поведении измельчаемого клинкера в присутствии нефтяного кокса можно объяснить тем, что при схожих размерах выгорающей добавки и клинкерных частиц, добавка при измельчении раздавливается более твердыми крупными частицами клинкера. При этом клинкерные частицы покрываются слоем нефтяного кокса с последующим увеличением скорости измельчения.

Таким образом, установлено влияние фракционного состава нефтяного кокса на эффективность измельчения портландцементного клинкера. При измельчении клинкерных частиц фракционного состава: 1,25-0,315мм – 65% и 0,315-0 мм – 35%, увеличение скорости измельчения наблюдается при вводе 0,5-1,5% добавки фракции 0,2-0,08мм. Использование добавки фракции 0,08мм, в количестве менее 1,0% приводит к замедлению скорости измельчения цемента. При использовании в качестве интенсификатора помола нефтяного кокса фракции 0,08мм при исследованных концентрациях наблюдается остановка увеличения удельной поверхности цемента при достижении $250\text{ м}^2/\text{кг}$.

Помимо влияния горючих отходов на физико-химические процессы при получении цемента, ввод техногенных материалов в сырьевую смесь может влиять и на качество готового продукта.

Для изучения влияния различных техногенных отходов, содержащих горючую составляющую на свойства цемента, в работе были исследованы отходы сельского хозяйства, бумажные отходы, отходы маслопереработки, отходы деревопереработки.

Все исследуемые отходы вводились в количестве 5 и 10% в шлам Белгородского цементного завода, химический состав которого представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Химический состав сырьевого шлама ЗАО «Белгородский цемент»

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	ППП
14,03	3,49	2,84	43,17	0,42	0,09	0,5	0,16	0,25	35,13

Отходы сельского хозяйства в России сегодня – почти невостребованный ресурс. Используется лишь 10% всего объема соломы. Между тем, масса накопления соломы злаковых и крупяных культур в России за год составляет 80 – 100 млн. тонн. При этом чаще всего солому сжигают или запахивают в землю, а она имеет высокую теплотворную способность – 16 МДж/кг [10, 11].

Введение 5 и 10% соломы в сырьевую смесь не повлияло на скорость обжига клинкера, поскольку все клинкеры имели близкое содержание СаОсв, не превышающее 2%.

Определение прочностных показателей цемента, полученного из обожженного в присутствии выгорающей добавки клинкера, показало, что в начальные сроки твердения (2 суток) наибольшей гидравлической активностью обладал контрольный цемент. К 7 суткам твердения наивысшая прочность у образцов из клинкера с добавкой – 10% составила 74 МПа. К 28 суткам твердения прочность образцов из клинкера без добавок составила 90 МПа. Наивысшая прочность выявлена у образцов с добавкой 10%. Добавка соломы 5% практически не оказывает влияние на прочность (табл. 3).

По полученным данным видно, что при подаче соломы в шлам в количестве 10% цемент имеет наивысшую прочность по сравнению с цементами из бездобавочного клинкера и клинкера с 5% добавки.

Расчетом установлено, что замена части технологического топлива на солому, позволит сэкономить от 1,5 до 3,1% газообразного топлива.

Бумажная вощеная упаковка состоит из нескольких перемежающихся слоев полиэтилена (около 25%) и картона (около 75%), поэтому ее достаточно сложно перерабатывать, а потребление

продукции в таких пакетах широко распространено, поэтому они в огромных количествах отправляются на свалку. Теплотворная способность исследуемого отхода составляет 28МДж/кг [11].

О завершении реакций образования клинкерных минералов в процессе обжига судили по содержанию свободного оксида кальция в обожженных клинкерах. Во всех клинкерах, синтез клинкерных минералов можно считать завершенным, так как содержание СаОсв не превышает 2%.

Как видно из табл. 3, и в начальные сроки твердения, и в возрасте 28 суток, наивысшая прочность выявлена у образцов с добавкой 10%. Добавка отходов в количестве 5% практически не оказывает влияния на прочностные характеристики.

Расчетом установлено, что замена части технологического топлива на бумажные отходы позволяет сэкономить от 2 до 6 % газообразного топлива.

Лузга – отход маслопереработки, которая образуется при выделении ядра подсолнечника на маслопрессовых заводах в количестве около 14% от общего количества семян. Брекеты и гранулы из лузги подсолнечника также могут быть прекрасной альтернативой дорогим, невозстанавливаемым и вредным для экологии видам топлива углю и газу, более того, они дешевле древесных пеллет. Для изготовления брикетов лузга дробится и прессуется в гранулы. Конечная влажность готового продукта составляет 8-12%, а исходный материал уплотняется в 5-10 раз. Это удобно и для хранения, и для транспортировки. При частичной замене технологического топлива лузгу можно использовать и в непрессованном виде. Топливо из подсолнечной лузги имеет неоспоримые преимущества: такой вид топлива в два раза дешевле угля; топливо экологически чистое; лузга имеет очень небольшую зольность – до 3%; теплотворная способность лузги составляет до 22, тогда как газа до 37 МДж/кг.

В начальные сроки твердения наибольшей прочностью обладал цемент на основе клинкера, синтезированного с добавкой 5% маслоотхода. К 28 суткам твердения прочностные характеристики цементного камня выравниваются. Ввод маслоотходов в шлам не оказывает отрицательного влияния на качество клинкера и количество выгорающей добавки ограничивается только избытком воздуха, необходимым для ее сгорания. Добавка в шлам до 3 % лузги от массы сырьевой смеси позволит сэкономить 2,14% технологического топлива (табл. 3).

Отходы деревообрабатывающей промышленности (ДОП) обладают допустимой теплотворной способностью 15-20 МДж/кг или 3500-4500 ккал/кг [12-13].

Введение отходов-ДОП в сырьевую смесь в качестве выгорающей добавки показало, что в начальные сроки твердения наибольшей гидравлической активностью обладает цемент на основе клинкера, синтезированные с добавкой 10% отходов-ДОП.

К 28 суткам твердения прочность цементного камня из клинкера с добавкой 10% ДОП превысила прочность бездобавочного цемента (табл. 3).

С точки зрения экономии топлива предложенная технологическая операция ввода до 10% отходов-ДОП от сырьевой смеси в качестве выгорающей добавки позволяет сэкономить до 3,1% природного газа, что делает способ частичной замены технологического топлива на альтернативное достаточно эффективным.

Таким образом, ввод всех исследованных горючих отходов в сырьевую смесь положительно сказался на прочности цементного камня. Кроме того, стоимость утилизации отходов при этом гораздо ниже стоимости их обезвреживания на специальных установках, требующих значительных капитальных и операционных затрат [14].

Таблица 3 – Влияние ввода горючих отходов в сырьевую смесь на качество цемента

Отход, содержащую горючую составляющую	Количество вводимой в шлак добавки, %	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте, сут		
		2	7	28
Цемент из бездобавочного клинкера		44	69	89
Солома	5	38	63	88
	10	41	74	90
Бумажная вощеная упаковка	5	42	63	81
	10	54	69	108
Лузга – отход маслопереработки	5	48	63	100
	10	43	63	87
Отходы деревопереработки	5	40	77	88
	10	45	79	96

Введение выгорающих добавок в сырьевую смесь при обжиге клинкера с целью увеличения энергоэффективности производства приводит к изменению физико-химических процессов при производстве цемента. Присутствие выгорающих добавок могут оказывать влияние на адгезионно-когезионные свойства шлама в процессе его сушки, возгонку сульфатов в результате изменения газовой среды в печи, на процесс измельчения клинкера. Следовательно, при использовании той или иной добавки необходимо комплексное исследование всех процессов в ее присутствии.

Прочность цементного камня при введении до 5-10% выгорающих добавок, как правило, не уступает или даже превышает прочность цементного камня на основе рядового клинкера.

Выводы.

1. Введение выгорающей добавки в сырьевой шлам приводит к изменению его адгезионно-когезионных свойств и, следовательно, к изменению характера кривой сушки шлама в зоне цепной завесы. Независимо от компонентного состава сырьевого шлама лигнин смещает критическую влажность в сторону увеличения влажности шлама, тем самым, сокращая зону пылеулавливания и увеличивая зону пылеобразования.

2. Создающие в печи локальную восстановительную атмосферу выгорающие добавки приводят к уменьшению температуры начала возгонки сульфатов и ее ускорению, что может привести к образованию сульфатных колец в печи. В случае производства сульфатерритного клинкера, являющегося добавкой при получении расширяющихся цементов, ранняя возгонка сульфатов влечет за собой получение брака.

3. Влияние нефтяного кокса на интенсификацию процесса измельчения клинкера зависит от фракционного состава кокса. Введение в клинкер более крупных частиц кокса размером 0,315-0 мм приводит к интенсификации помола, а введение в клинкер частиц кокса размером 0,08мм, напротив, существенно замедляет его.

4. Использование различных горючих техногенных отходов в качестве выгорающих добавок в количестве 5-10% позволяет получать цемент не уступающий по прочностным характеристикам рядовому и позволяет экономить до 3% основного топлива.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта № НК-14-41-08025/15 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Губарева В.В., К.С. Ракитченко, 2005. Снижение расхода топлива при производстве цемента. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 10: 65-67.
2. Тонгбо С., 2012. Использование промышленных отходов в цементной промышленности Китая. AlitInform, 6: 6-15.
3. Жарко В.И., В.А. Гузь, Е.В. Высоцкий 2010. Использование отходов в цементной промышленности России. Цемент и его применение, 6: 60-62.
4. Классен В.К., 1994. Обжиг цементного клинкера, pp: 323.
5. Классен В.К., И.Н. Борисов, В.Е. Мануйлов, 2008. Техногенные материалы в производстве цемента, pp: 125.
6. Тимашев, В.В. Л.М. Сулименко, Б.С. Альбац, 1978. Агломерация порошкообразных силикатных материалов, pp: 136.
7. Osokin A.P., Y.R. Krivoborodov and N.F. Dyukova, 1990. Sulfoferrite cements. Proceedings of 9th ICCS. v. 3, pp: 256-261.
8. Осокин А.П., Ю.Р. Кривобородов и Е.Н. Потапова, 1993. Модифицированный портландцемент. Москва, стр: 328.
9. Dr. Roppelt T., Dr. W. Dienemann, Prof. Dr. R. Klaska, I. Leth and Th. Sievert, 2006. Use of alternative raw materials for cement clinker production. Cement International, 1: 54-63.
10. Альтернативное топливо. Переработка отходов сельского хозяйства. <http://www.ipa-don.ru/offers/projects/altt>.
11. Топливные брикеты. Пеллеты. Альтернативное топливо. <http://press-briket.blogspot.ru/2008/10/blog-post.html>.
12. Головков С.И., И.Ф. Коперин, В.И. Найденов, 1987. Энергетическое использование древесных отходов, pp: 224.
13. Равич М.Б., 1977. Эффективность использования топлива, pp: 344.
14. Bushihin V., 2006. The current state and prospects of development of the cement industry in Russia, report on the III Scientific Conference «Modern Cement Plant».

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ВИДЕ НЕЧЕТКИХ ДИАГРАММ ПОВЕДЕНИЯ

ALL_EXE@mail.ru

Ващенко Р.А. аспирант,
Бажанов А.Г., канд. техн. наук, доц.,
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.
*Белгородский государственный технологический
университет им В.Г. Шухова*

Аннотация. Рассмотрены вопросы адекватности применения нечетких диаграмм поведения в качестве моделей узлов технологических объектов. Приведены возможности применения теории статистического анализа для работы с нечеткими величинами. Также приведен пример выполнения оценки на адекватность на основе корреляции фазифицированных значений реальной величины и выхода модели с применением нечетких диаграмм поведения.

Ключевые слова: нечеткая диаграмма поведения, узел, статистический анализ, адекватность.

Введение. Вопрос автоматизации остается до сих пор нерешенным для целого ряда производственных процессов, имеющих многосвязный объект управления с распределенными параметрами, большим запаздыванием и ограниченным количеством органов управления. Нестационарность и сложность протекающих в таких объектах физико-химических процессов, большое количество внешних возмущений, взаимное влияние технологических величин и параметров друг на друга, не позволяют производить исследования и моделирования с помощью стандартных математических приемов. В связи с этим применение традиционных методов теории автоматического управления к разработке системы управления не приводят к сколь угодно устойчивому регулированию.

Чтобы получить возможность проводить детальное изучение всех процессов таких объектов, существует подход к созданию систем управления на базе нечетких диаграмм поведения узлов. Суть подхода состоит в замене непрерывного поведения технологической величины ее дискретным представлением в виде режимов, представляющих собой элементарную часть переходного процесса, происходящего с этой величиной в объекте [1]. Такой подход является исследованием

технологических процессов «снизу» и для его реализации строятся модели в виде нечетких диаграмм поведения узлов (рис.1), которые служат основой для создания автоматизированной системы управления [2].

Модель, полученная при применении данного подхода, содержит всю необходимую информацию о работе технологической величины, а также позволяет учитывать дополнительные возможные ситуации, в том числе нештатные и аварийные, что повышает надежность разрабатываемой системы [3]. Несмотря на это, методы анализа подобных моделей недостаточно развиты.

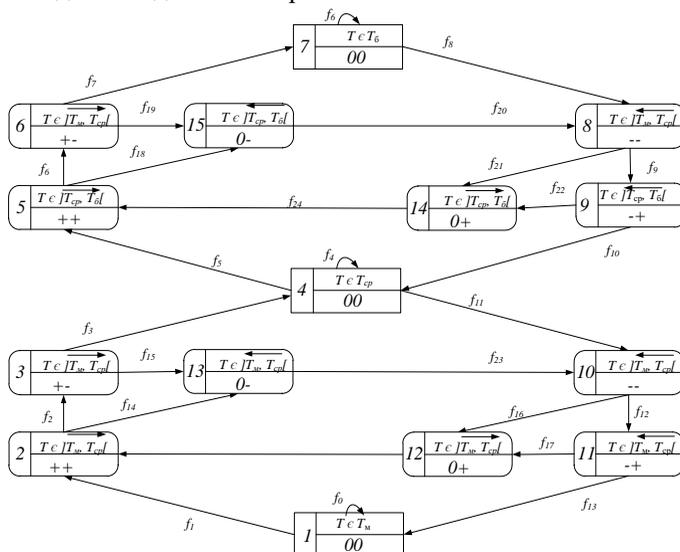


Рисунок 1 – Нечеткая диаграмма поведения

Основная часть. Наиболее распространенным способом подтверждения работоспособности проектируемых моделей является использование методов математической статистики. Процедура оценки основана на проверке гипотезы о близости среднего значения наблюдаемой переменной Y среднему значению отклика реальной системы Y^* .

В результате N_0 опытов на реальной системе получают множество значений Y^* . Выполнив $N_э$ экспериментов на модели, также получают множество значений наблюдаемой переменной Y . Затем вычисляются оценки математического ожидания и дисперсии откликов модели и

системы, после чего выдвигается гипотеза о близости средних значений величин Y^* и Y . Основой для проверки гипотезы является распределение Стьюдента. Значение, вычисленное по результатам испытаний, сравнивается с критическим значением $t_{кр}$, взятым из справочной таблицы. Если выполняется неравенство $t < t_{кр}$, то гипотеза принимается.

Также адекватность модели может быть вычислена по дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов системы и по максимальному значению относительных отклонений откликов модели от откликов системы.

Использование статистических методов для оценки модели в виде нечеткой диаграммы поведения не представляется возможным, поскольку на выходе диаграммы поведения мы получаем информацию о режиме функционирования узла, а не конкретное количественное значение технологической величины [4].

Целесообразно применять подходы, основанные на сравнении характера поведения моделируемой величины с ее реальными значениями. Одним из таких подходов является корреляционный анализ.

Критерий корреляции Пирсона – это метод параметрической статистики, позволяющий определить наличие или отсутствие линейной связи между двумя количественными показателями, а также оценить ее тесноту и статистическую значимость. Другими словами, критерий корреляции Пирсона позволяет определить, есть ли линейная связь между изменениями значений двух переменных. Коэффициент корреляции Пирсона может быть вычислен по формуле

$$R_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 * \sum (y_i - \bar{y})^2}},$$

где R_{xy} – коэффициент линейной корреляции; \bar{x}, \bar{y} – средние выборочные значения сравниваемых величин; x_i, y_i – частные выборочные значения сравниваемых величин.

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена используется для выявления и оценки тесноты связи между двумя рядами сопоставляемых количественных показателей. В том случае, если ранги показателей, упорядоченных по степени возрастания или убывания, в большинстве случаев совпадают (большему значению одного показателя соответствует большее значение другого показателя), то делается вывод о наличии прямой корреляционной связи. Если ранги

показателей имеют противоположную направленность, то говорят об обратной связи между показателями. Сопоставляемые показатели могут быть измерены как в непрерывной шкале, так и в порядковой. Для вычисления коэффициента ранговой корреляции необходимо:

- сопоставить каждому из признаков их порядковый номер (ранг) по возрастанию или убыванию;
- определить разности рангов каждой пары сопоставляемых значений (d);
- возвести в квадрат каждую разность и суммировать полученные результаты;
- вычислить коэффициент корреляции рангов по формуле

$$p = 1 - \frac{6 * \sum d^2}{n * (n^2 - 1)};$$

- определить статистическую значимость полученного коэффициента.

Как было отмечено ранее, выход рассматриваемой модели содержит информацию о режиме функционирования узла, поэтому для вычисления коэффициента корреляции отклик модели предварительно отображается графически. Построение таких графиков производится кусочно на основе знаний о характере поведении технологической величины в конкретном типовом режиме.

Степень детализации этих данных зависит от ранга типовых режимов, положенных в основу построения диаграммы. Так, диаграмма поведения 1-го ранга отображает информацию лишь о направлении изменения технологической величины, в то время как диаграмма поведения 2-го ранга позволяет судить и о характере ее изменения. Выбор порядка ранга зависит от цели моделирования.

Анализируя величину полученного коэффициента корреляции можно сделать вывод о наличии и тесноте связи между откликом модели и реальным объектом. В общем случае принято считать значения коэффициента равные 0,3 и менее – показателями слабой тесноты связи; значения более 0,4, но менее 0,7 – показателями умеренной тесноты связи, а значения 0,7 и более – показателями высокой тесноты связи.

Для оценки работоспособности модели в виде нечеткой диаграммы поведения предлагается ещё один подход, который позволяет оценить идентичность поведения отклика модели и системы на одинаковом интервале времени.

Располагая набором знаков производных на выходе нечеткой диаграммы поведения, где каждой позиции соответствует пара: «знак первой производной» и «знак второй производной», можно получить аналогичный набор производных, вычисленных уже на основе реального изменения технологической величины

$$Y' = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Y(t + \Delta t) - Y(t)}{\Delta t}.$$

Стоит отметить, что характер поведения может быть одинаков в нескольких позициях диаграммы, но значение будет отличаться значительно (рис.2). Например, в позициях 1 и 4, знаки производных совпадают, однако в первом случае, величина сохраняет значение на уровне «минимум», а во втором – на уровне «норма». В связи с этим необходимо учитывать предыдущий характер изменения.

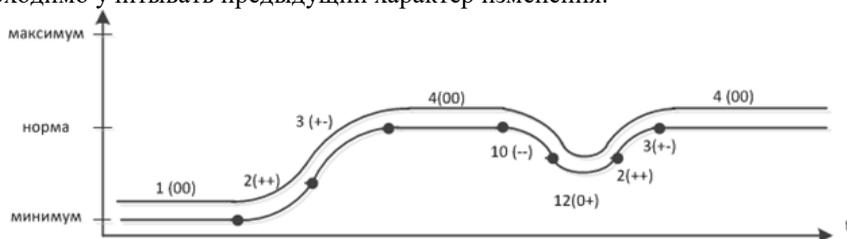


Рисунок 2 – Изменение технологической величины согласно нечеткой диаграмме поведения

Таким образом, сравнив полученные последовательности, можно сделать вывод об идентичности поведению технологической величины на выходе модели в виде нечеткой диаграммы поведения с данными, полученными непосредственно с объекта управления.

Заключение. Рассмотрев особенности применения подхода для создания систем автоматизированного управления сложными технологическими процессами на основе нечетких диаграмм поведения, можно говорить о целесообразности использования предложенных методов оценки моделей технологических величин.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Магергут В.З., Игнатенко В.А., Бажанов А.Г., Шаптала В.Г. Подходы к построению дискретных моделей непрерывных технологических процессов для синтеза управляющих автоматов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Белгород. 2013. №2. С. 100–102.
2. Магергут В.З., Юдин Д.А., Бажанов А.Г., Порхало В.А., Копылов А.С., Степовой А.А., Ващенко Р.А. Интеллектуальная советующая система управления цементными вращающимися печами с применением технического зрения // Мир цемента. 2013. №2. С. 51 – 59.
3. Bazhanov A.G., Magergut V.Z., Vashchenko R.A. Operation model of the cement kiln node “Material temperature in the drying zone” as a fuzzy behavior chart // Proceedings of The International Conference on Information and Digital Technologies 2015. Zilina: IEEE Xplore, 2015. Pp. 35 – 38.
4. Vashchenko R.A, Stepovoy A.A, Bazhanov A.G, Magergut V.Z. 2016. Application of the model based on fuzzy behavior charts in the advising control system of rotary cement kiln // Proceedings of The International Conference on Information and Digital Technologies 2016. Zilina: IEEE Xplore, 2016. Pp. 300 – 305.

РАДИАЦИОННЫЙ ОТЖИГ ПОКРЫТИЙ TiO_x СФОРМИРОВАННЫХ РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОННЫМ МЕТОДОМ

vvs25@yandex.ru

Вашилин В.С., канд. биолог. наук,
Колесник В.В., канд. техн. наук,
Евтушенко Е.И., д-р техн. наук, проф.,
Карацупа С.В., канд. техн. наук,
Корнилов А.В. канд. физ - мат. наук,
Зайцев С.В. науч. сотр.,
Прохоренков Д.С., науч. сотр.,
Лимаренко М.В. науч. сотр.

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

Аннотация. В работе представлены морфологические и оптические свойства тонких пленок диоксида титана, сформированных методом реактивного магнетронного распыления, на подложку из предметного стекла, с последующей модификацией покрытия радиационным нагревом в вакууме. Проведены сравнительные исследования оптических и рентгенографических исследований TiO_x в течении четырех минут вакуумного отжига покрытий при температуре 350 и 600°C.

Ключевые слова: оксид титана, магнетронное распыление, вакуумный радиационный отжиг, анатаз.

Введение.

Пленки диоксида титана относятся к группе оксидов переходных металлов, которые обладают свойствами широкозонных полупроводников. Они обладают высоким показателем преломления и низким поглощением в видимом диапазоне света. В связи с этим пленки успешно используются в качестве многослойных зеркал, планарных волноводах [1]. Покрытия TiO_2 также применяют в качестве фотокатализаторов [2–9], кроме того их используют в микроэлектронике, благодаря высокому значению диэлектрической проницаемости оксидов переходных материалов [10–13]. Для применения покрытий диоксида титана в качестве биокатализаторов

важна их сорбционная способность, которая определяется структурой и толщиной пленок [14].

Диоксид титана имеет три основные модификации: рутил, анатаз и брукит. Брукит является природным материалом и крайне редко встречается в искусственно сформированных покрытиях. Анатаз переходит в наиболее стабильную высокотемпературную фазу рутила при температурах 673-1273 К [15-18].

Тонкопленочные диэлектрики, сформированные на поверхности аморфных подложек, чаще всего обладают либо поликристаллической, либо аморфной структурой.

Методика.

TiO₂ – покрытия были получены реактивным дуальным магнетронным методом на установке QUADRA 500 TM (НПФ «Элан-Практик») в аргон-кислородной среде (чистота Ar и O₂ не менее 99,999%). Разрядный ток составлял 0,5 А, рабочее давление 0,6 Па, концентрация O₂ составляла 35 об.%. В качестве мишеней использовались две титановые пластины (доля Ti 99,99 мас.%), время напыления покрытия диоксида титана составляло 185 мин. Подложки представляли собой предметные стекла «МиниМед» с размерами 76x26x1 мм и составом МТО (ГОСТ 19808-86). Расстояние от мишени до подложки было 100 мм [19].

Отжиг TiO₂-покрытий производился в фотонной вакуумной печи STE RTP 150 (ЗАО НТО SemiTeq). Перед отжигом камера осушалась потоком сухого азота (классификация ОЧ) до точки росы -40°C, температура отжига контролировалась платиновой (может быть платина-платинородиевой) термопарой и составляла 350 и 600°C. Образцы с полученными покрытиями подвергались радиационному отжигу продолжительностью 4 минуты, при рабочем давлении 10³ Па.

Кристаллическая структура и преимущественная ориентация зерен тонких TiO₂-покрытий исследовалась с помощью рентгеновской дифракции ARL X`TRA (ThermoTechno) в диапазоне углов 2θ от 10° до 90° с шагом 0,02°. Для идентификации фаз и индексирования пиков использовалась картотека JCPDF.

Морфология поверхности и фрактограммы покрытий исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MRA 3 LMU [20, 21].

Результаты.

На фрактограммах отожженных покрытий по сравнению с исходным образцом можно условно выделить два участка: один,

контактирующий с подложкой, имеет строение, характерное для спеченных материалов, другой, внешний, обладает столбчатой структурой зерен исходного покрытия, но несколько разреженной (Рис. 1).

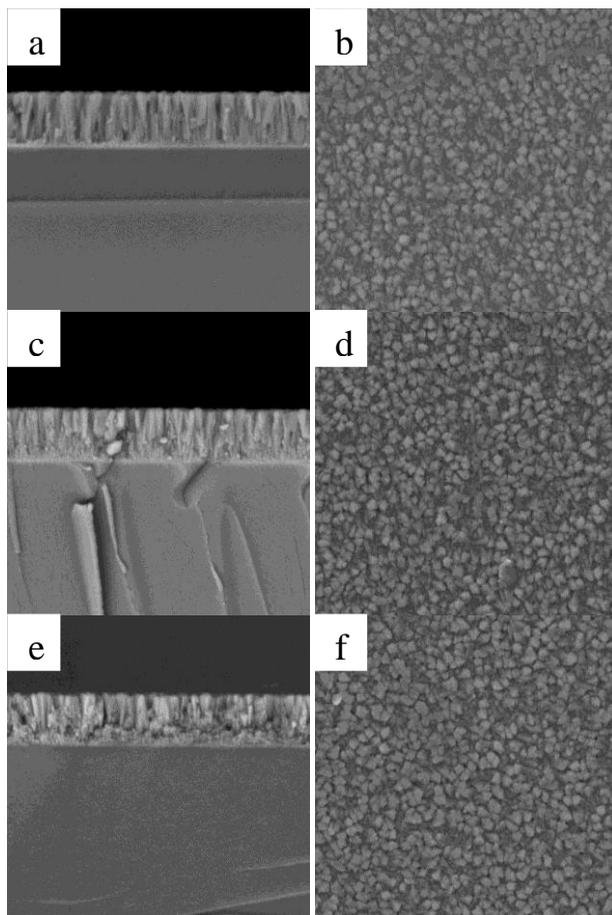


Рисунок 1 – Фрактограммы (а, с, е) и поверхность (b, d, f) TiO_x -покрытий в зависимости от температуры фотонного вакуумного отжига: а, b – без отжига; с, d – 300°C ; е, f – 600°C .

Фазовый состав, который для исходного покрытия представлен аморфной составляющей и небольшим количеством анатаза,

претерпевает основные изменения за первые 5 мин фотонного отжига [19]. В частности, происходит рост зерен анатаза, наблюдаемых в исходном покрытии, вдоль направлений (101), (211), и кристаллизация, вероятно из аморфной компоненты, зерен анатаза других ориентаций (дающих пики (200) и (103)) (Рис. 2).

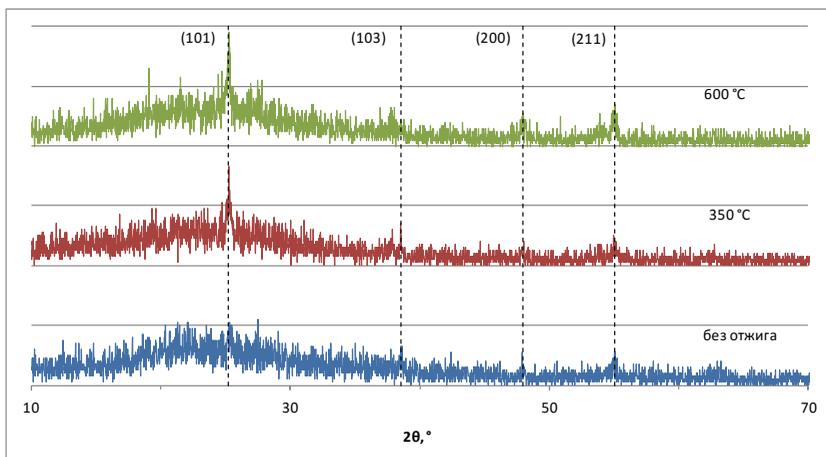


Рисунок 2 – Дифрактограммы покрытий TiO_x.

Выводы.

Радиационный отжиг в вакууме аморфного покрытия TiO_x приводит к его кристаллизации, образуется структура анатаза, что видно из дифрактограмм. Причем даже при отжиге в 600° С не обнаружены пики рутила.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08064 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Wang Z. Optical Properties of Anatase TiO₂ Thin Films Prepared by Aqueous Sol – Gel Process at Low Temperature // Thin Solid Films, 2002. Vol. 405. P. 50-54.
2. Fujishima A. K. Honda. TiO₂ photoelectrochemistry and photocatalysis // Nature. 1972. V. 37. P. 238.
3. Fujishima A., T. Rao, D. Tryk. Preparation of unique TiO₂ nano-particle photocatalysts by a multi-gelation method for control of the

- physicochemical parameters and reactivity // *J. Photochem. Photobiol. C*. 2000. V. 1, N.1, P. 1-21. 99
4. Barros K., K. Albertin, J. Miyoshi, I. Doi, J.A. Diniz. Thin titanium oxide films deposited by e-beam evaporation with additional rapid thermal oxidation and annealing for ISFET applications // *Microelectronic Engineering*. 2010. V. 87. P. 443-446.
 5. Fukuda H., S. Maeda, K. M. Salam. Patterning titania with the conventional and modified micromolding in capillaries technique from sol-gel and dispersion solutions // *Jpn. Appl. Phys.* 2002. V. 41. P. 6215-6217.
 6. Zhang I.Y., J. Lu. K. Onodera. Neurogenesis, angiogenesis, and more indices of functional recovery from stroke // *Sensors and Actuators*, 2007. V. 139. P. 337-342.
 7. Cheng H. E. The effect of substrate temperature on the physical properties of tantalum oxide thin films grown by reactive radio-frequency sputtering // *Mater. Research Bulletin*, 2003. V.38. P. 1841-1849.
 8. Gan J.Y, Y. C. Chang, T. B. Wu. Dielectric property of $(\text{TiO}_2)_x-(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{1-x}$ thin films // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 72, № 3. P. 332-334.
 9. Campbell S, H. Kim, D. Gilmer. Structural and Electrical Properties of Crystalline TiO_2 Thin Films Formed by Metalorganic Decomposition // *IBM Journal of Research and Development*. 1999. V. 43. P. 383.
 10. Johnson R, G. Lucovsky, J. Hong. Electronic structure of noncrystalline transition metal silicate and aluminate alloys // *Microelectronic Engineering*. 2001. P. 385-391.
 11. M. Ulrich, R. Johnson, J. Hong. Molecular profiling approaches for identifying novel biomarkers // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2002. V. 20, № 4. P. 1732-1738.
 12. Takahashi T, M. Asada, Masugata K. Production of Highly Lubricious Ti-Based Ceramic Films for Reducing Friction between Web and Transiting Roller // *Thin Solid Films*. 1999. V. 343. P. 273-276.
 13. Venkataraj S, D. Severin, S. Mohamed S., Ngaruiya, J., Kappertz, O., Wuttig, M. Towards understanding the superior properties of transition metal oxynitrides prepared by reactive DC magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2006. V. 502. P. 228-234.
 14. Киселева Е.С. Физико-механические свойства пленок диоксида и оксинитрида титана, осажденных методом реактивного магнетронного распыления: дис. канд. ф-м. наук. Томск, 2016. 113 с.
 15. Gyorgy E., G. Socol, E. Axente, I.N. Mihailescu, C. Ducu, S. Ciuca. Anatase phase TiO_2 thin films obtained by pulsed laser deposition for gas sensing applications // *Applied Surface Science*. 2005. V. 247. P. 429-433.
 16. Nakaruk A.D. Ragazzon, C.C. Sorrell. Anatase-rutile transformation through high-temperature annealing of titania films produced by ultrasonic spray pyrolysis // *Thin Solid Films*. 2010. V. 518. P. 3735-3742.

17. Byun C., J.W. Jang, I.T. Kim, K.S. Hong, B.-W. Lee. Anatase-to-rutile transition of titania thin films prepared by MOCVD // *Materials Research Bulletin*. 1997. V. 32, № 4. P. 431-440.
18. Лобанов М.В. Структура и свойства тонкопленочного диоксида титана модифицированного ниобием, индием и оловом: дисс. канд. хим. наук. Воронеж. 2015. 126 с.
19. Vaschilin V.S., Nartsev V.M., Zaitsev S.V., Prokhorencov D.S., Limarencov M.V., Evtushenko E.I Photon annealing of titanium dioxide coatings produced by magnetron method. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. T. 8. C. 18179-18192
20. Zaitsev S.V., V.S. Nartsev, V.S. Vaschilin, D.S. D.S. Prokhorenkov and E.I. Evtushenko. Microstructure and surface morphology of thin AlN films formed on sapphire by dual magnetron sputtering // *Nanotechnologies in Russia*. 2016. T. 11. C. 280-286.
21. Зайцев С.В., Ващилин В.С., Прохоренков Д.С., Нарцев В.М., Евтушенко Е.И., 2015. Структура тонких пленок диоксида олова, формируемых методом дуального магнетронного распыления // *Вестник БГТУ им.В.Г. Шухова*. № 5. 2015. С. 228-231.

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗО- И
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ
СОВМЕСТНОМ ПИРОЛИЗЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА БЕЛГОРОДСКОЙ
ОБЛАСТИ С МОНТМОРИЛЛОНИТ СОДЕРЖАЩИМИ
ГЛИНАМИ**

vesentsev@bsu.edu.ru

**Везенцев А.И., д-р техн. наук, проф.,
Перистый В.А., канд. техн. наук, проф.,
Тохтарь В.К., д-р биолог. наук, проф.,
Коробов В.А., д-р с-х. наук, проф.,
Буханов В.Д., канд. вет. наук, доц.,
Соколовский П.В., канд. техн. наук,
Перистая Л.Ф., доцент,
Михайлюкова М.О., аспирант**

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

Аннотация. В данной статье представлены результаты фундаментальных исследований по изучению процессов фазо- и структурообразования, протекающих при совместном пиролизе растительных отходов агропромышленного комплекса Белгородской области с местными монтмориллонит содержащими глинами, подтвержденные экспериментальными данными. Дано термодинамическое (термохимическое) описание процессов фазообразования при совместном пиролизе растительных отходов, экранированных монтмориллонит содержащей глиной. Выявлено влияние вещественного состава, текстурных и структурно-морфологических характеристик на сорбционные свойства экспериментальных композиционных сорбентов. Разработаны физико-химические основы способа получения порошкообразных и гранулированных композиционных сорбентов для очистки модельных водных растворов от ионов тяжелых металлов (Fe^{3+}), органических красителей (метиленовый голубой (МГ) и конго красный (КК)), условно-патогенных бактерий (тест-культура *Escherichia coli* ATCC 25922) в статическом и динамическом режимах. Выявлены кинетические закономерности очистки модельных водных растворов от ионов тяжелых металлов, органических веществ, условно-патогенных

бактерий экспериментальными сорбентами в статическом и динамическом режимах. Методом биоиндикации в вегетационном опыте на модельных растениях, с использованием листовой ИК-спектроскопии определена эффективность детоксикации почвы от пестицидов при внесении экспериментальных сорбентов.

Ключевые слова: синтез, пиролиз, механизм сорбции, исследование процессов, термодинамика, фазообразование, экология, ионы тяжелых металлов, условно-патогенные бактерии, пестициды, композиционный сорбент, отходы растениеводства, агропромышленный комплекс, монтмориллонит содержащие глины.

На сегодняшний день глобальной проблемой человечества является загрязнение окружающей среды. Исследователи всего мира проводят фундаментальные и прикладные исследования, направленные на разработку новых сорбционно-активных материалов для ингибирования воздействия различных поллютантов [1 - 3]. В данной работе на основании разработанной научной гипотезы и проведенных фундаментальных исследований предложены физико-химические основы технологии получения композиционных сорбентов из недорогих сырьевых материалов, имеющихся на территории Белгородской области: монтмориллонит содержащих глин и растительных отходов агропромышленного комплекса (лузги семян подсолнечника). Выбор сырьевых компонентов обусловлен их доступностью, низкой себестоимостью и большими запасами. Кроме того, отходы растениеводства относятся к возобновляемым ресурсам. Оба вида ресурсов имеют широкую сырьевую базу, достаточную для промышленного производства сорбентов на их основе [4, 5]. Процесс получения композиционных сорбентов из данных материалов представляет собой высокоэффективный энергосберегающий пиролиз в среде с ограниченным доступом кислорода. Это обеспечивается тем, что формируется композит из растительных отходов совместно с монтмориллонитовой глиной и подвергается термической обработке. Причем глина обволакивает поверхность растительных отходов, обеспечивая ограничение доступа кислорода, что позволяет вести пиролиз без использования вакуума или среды инертных газов, или азота.

Материалы и метод исследования

В качестве сырьевых материалов для получения композиционных сорбентов использовалась монтмориллонит содержащая глина

Белгородской области проявления Нелидовка (Корочанский район) и растительные отходы агропромышленного комплекса Белгородской области (лузга семян подсолнечника). На основе сырьевых материалов получены композиционные сорбенты в порошкообразном и гранулированном виде. Способ получения композиционных сорбентов заключался в следующем. Исходную монтмориллонитовую глину (влажностью до 20 масс. %) дополнительно увлажняли до пастообразного состояния и смешивали с лузгой семян подсолнечника таким образом, чтобы глина полностью ее покрывала. Затем полученный композит загружали в фарфоровый тигель и проводили термообработку в интервале температур 20 – 750°C. Температуру, продолжительность термической обработки и массовое соотношение компонентов глина: лузга семян подсолнечника (Г : Л) изменяли для определения оптимальных параметров синтеза композиционного сорбента. Важным моментом являлось то, что для полного предотвращения доступа воздуха к лузге семян подсолнечника, 1/4 часть тигля сверху засыпали монтмориллонитовой глиной влажностью до 15 масс. % и с размером частиц менее 80 мкм. Принципиальная схема получения композиционных сорбентов представлена на рисунке 1. Выбор оптимального режима термической обработки и состава композиционного сорбента производился по выходу конечного продукта в процессе синтеза. При определении оптимальных параметров синтеза композиционного сорбента оценивался массовый выход конечного продукта – композиционного сорбента после проведенного пиролиза при различных температурах и массовом соотношении глина: лузга семян подсолнечника. Результаты представлены на рисунке 2.

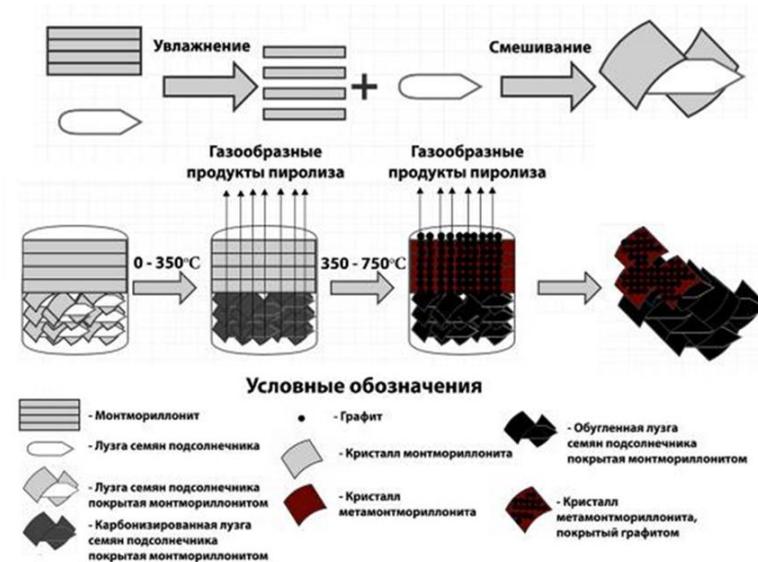


Рисунок 1 – Принципиальная схема получения композиционных сорбентов

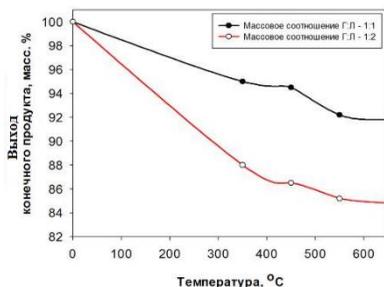


Рисунок 2 – Зависимость выхода конечного продукта – гранулированного композиционного сорбента от параметров синтеза (массового соотношения Г : Л и температуры)

В данной работе проведено термодинамическое описание процессов фазообразования при совместном пиролизе растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной. С этой целью сконструирована и изготовлена экспериментальная установка пиролиза, схема которой представлена на рисунке 3.

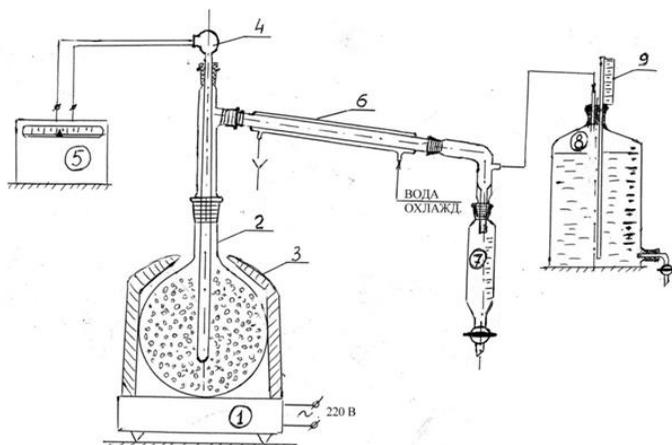


Рисунок 3 – Схема экспериментальной лабораторной установки исследования термохимии фазообразования процесса пиролиза растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной: 1 – электрообогрев; 2 – термоколба; 3 – термоизоляция; 4 – термопара, ХА; 5 – электронный потенциометр, КСП-4; 6 – холодильник Либиха; 7 – сборник дистиллята; 8 – газосборник; 9 – манометрическая трубка.

С целью изучения теплового режима пиролиза растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной, была сконструирована и изготовлена термокамера, схема которой представлена на рисунке 4.

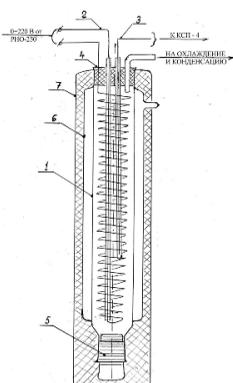


Рисунок 4 – Схема экспериментальной термокамеры для изучения термодинамического (термохимического) режима пиролиза отходов растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной (1 – корпус термокамеры; 2 – спираль электрическая; 3 – термопара; 4 – пробка уплотнитель; 5 – загрузочное горло; 6 – вакуумная рубашка; 7- термоизоляция)

Исследование адсорбции ионов Fe^{3+} на порошкообразном композиционном сорбенте проводилось в статических условиях [9], а на гранулированном – в динамических условиях. При проведении эксперимента в динамических условиях раствор, содержащий адсорбтив, пропускался с фиксированной скоростью через колонку, содержащую адсорбент. Фильтрат на выходе из колонки подвергался анализу. Концентрация модельного раствора была установлена по результатам исследования адсорбции ионов Fe^{3+} в статических условиях. Исходное значение концентрации Fe^{3+} составило 5 мг/л, что соответствует содержанию железа в поверхностных водах некоторых районов Белгородской области (для питьевой воды ПДК_{Fe} = 0,3 мг/л). Скорость фильтрации раствора устанавливается постоянной - 10 мл/мин. Высота слоя сорбента 1 см, масса навески сорбента 10 г, высота слоя жидкости над сорбентом 2 см, диаметр фильтра Шотта 2,9 см. Отбор фильтрата производили по 25 мл и 100 мл, в зависимости от дисперсности сорбента, до полного насыщения сорбента ионами Fe^{3+} , концентрация ионов Fe^{3+} в фильтрате становится равной исходной концентрации.

При определении сорбционных свойств композиционных сорбентов по отношению к органическим красителям в динамических условиях использовали метиленовый голубой и конго красный с исходной концентрацией 50 мг/л, которая была определена в ходе эксперимента в статических условиях. Отбор фильтрата производили по 25 мл и 100 мл, в зависимости от дисперсности сорбента до полного насыщения сорбента (концентрация красителей в фильтрате становится равной исходной концентрации).

Выяснение ингибирующего действия разработанных композиционных сорбентов по отношению к патогенным микроорганизмам (тест-культура *Escherichia coli* ATCC 25922) в зависимости от их концентрации осуществляли на мясопептонном агаре (МПА) в статических условиях по методике, описанной ранее [7]. Исследование антибактериальной активности в динамических условиях проводили с использованием сменной фильтрующей кассеты «БАРЬЕР-4» бытового фильтра для очистки воды. Через фильтрующую кассету пропускали модельные растворы питьевой воды, заведомо загрязненных кишечной палочкой (тест-культура *Escherichia coli* ATCC 25922). Опытные и контрольные образцы сорбционно-фильтрующих субстанций в одинаковом количестве (по 3 г) взвешивали на аналитических весах ОНАУС РА-114С (производитель компания ОНАУС Corporation, США) и помещали в воронки с фильтрами Шотта

(воронка фильтровальная ВФ-3, ГОСТ Р 51232-98), через которые производили фильтрацию модельных суспензий кишечной палочки. Размер пор в фильтре Шотта составлял 16-40 мкм (ГОСТ Р 51232-98). Концентрация эшерихий в контаминированных модельных взвешях превышала нормативы ГОСТа Р 51232-98 «Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества». При этом коли-титр был в 100 тыс, 1 млн, 10 млн, 100 млн и 1 млрд раз выше нормы (300 мл питьевой воды содержали 100 тыс, 1 млн, 10 млн, 100 млн и 1 млрд колониеобразующих единиц (КОЕ) эшерихий).

Эффективность детоксикации почвы от пестицидов проверена при внесении в почву порошкообразных и гранулированных композиционных сорбентов. Оценка очищающего действия композиционных сорбентов в почве проведена методом биоиндикации в вегетационном опыте на модельных растениях с использованием листовой ИК-спектроскопии. Данный метод подробно описан в работах [8, 9].

Основная часть

Для изучения процессов фазо- и структурообразования, происходящих при пиролизе лузги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной, проводили термическую обработку в реторте из нержавеющей стали в интервале температур 20 – 850°C в течение 120 минут [8]. Установлено, что газы (CO₂, H₂O) начинают выделяться при температуре 400°C спустя 20 минут после начала процесса пиролиза. Через 30 минут, когда температура достигла 600°C, началось выделение смол, которые представляют собой высоковязкую жидкость темно-коричневого (почти черного) цвета, с резким неприятным кисловатым запахом. Состав смол очень сложный и включает более 50 различных соединений. Спустя 42 минуты при температуре 700°C происходит выгорание органических смол, содержащихся в исходном сырье. На 44 минуте при температуре 800°C происходит выделение горючих газов (CH₄, CO, H₂). Установлено, что на протяжении всего процесса пиролиза лузги семян подсолнечника выделяется CO₂ в количестве 56,4 – 65,7 масс.% и CO в количестве 19,2 – 35,5 масс.%. Интенсивное выделение CH₄ начинается через 120 мин от начала термообработки и составляет 10,1 масс.%. Количество H₂ составляет 1,8 – 8,2 масс.%. Выбор оптимального режима термической обработки и состава гранулированного композиционного сорбента осуществлялся по выходу конечного продукта в процессе пиролиза. Основываясь на полученных данных

(рис. 2), сделан вывод о том, что оптимальными параметрами синтеза гранулированных композиционных сорбентов являются: массовое соотношение компонентов Г: Л = 1:1, температура изотермической стадии пиролиза 350 – 450°C. Это обусловлено тем, что увеличивая содержание лузги семян подсолнечника в композиционном сорбенте прочностные характеристики гранул не соответствуют требованиям, предъявляемым к сорбентам, которые используются в динамическом режиме.

С применением разработанных экспериментальной установки (рис. 3) и термокамеры (рис. 4) определены термодинамическое (термохимические) параметры процессов фазообразования при пиролизе отходов растительного сырья, экранированных монтмориллонит содержащей глиной. Термодинамика (термохимия) протекания процесса фазообразования при пиролизе лузги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной, представлена в таблице 1.

Пересчитав данные таблицы 1 относительно продуктов пиролиза, сделаны выводы о материальном балансе процесса пиролиза относительно лузги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной, а именно, массовый выход продуктов составил: 18,6 масс. % - газовая фаза пиролиза (плотность ее принята по СО); 34,2 масс. % - жидкий дистиллят (в том числе, смола отстойная 6,4 масс.%); 44,0 масс. % - уголь композитный (твердая фаза). Выходы ацетона, метанола, уксусной кислоты (в пересчете на исходную лузгу семян подсолнечника) составили: 1,09; 2,0 и 6,6 масс. %, соответственно.

Термодинамический (термохимический) режим пиролиза определяли при электронагреве лузги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной в термокамере (рис. 4). Количество тепловой энергии рассчитывали согласно закону Джоуля – Ленца: $Q=I^2R\tau$, где I - сила тока нагревателя термокамеры, А; R – сопротивление, Ом; τ – время, с. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Термодинамика (термохимия) протекания процесса фазообразования при пиролизе лузги подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной

№ п/п	Температура, °С	Продукты фазообразования пиролиза			Примечание
		газовая фаза пиролиза, л	жидкий дистиллят, мл	композит, г (твердая фаза)	
1	200	0,6	0,3	-	
2	300	6,8	10,2	-	Быстрое повышение температуры
3	400	10,4	31,1	-	Карбонизация
4	500	14,1	34,0	-	Карбонизация
5	600	14,3 ¹⁾	34,2 ²⁾	244,0	Затухание процесса газовой выделения и конденсатовыделения
<p>Примечание: ¹⁾ Газовая фаза по окончании пиролиза содержала: CO₂ – 41 об.%; CO – 36 об.%; углеводороды – 19 об.%. ²⁾ Жидкий дистиллят по окончании пиролиза содержал: ацетон – 3,5 масс.%; метанол – 5,8 масс.%; кислота уксусная – 31,2 масс.%; смола отстойная – 19 масс.%. </p>					

Установлено, что общее суммарное количество тепловой энергии, необходимое для осуществления процесса пиролиза, составляет 1,4 кДж на 1 кг композита, полученного из смеси монтмориллонит содержащей глины и лузги семян подсолнечника в массовом соотношении 1 : 2. Причем, процесс пиролиза в промышленных условиях следует проводить при переменном режиме теплопередачи, а именно: эффективный обогрев (подвод тепла) следует осуществлять до достижения температуры 200 - 300°С; при достижении этой температуры необходимо снизить количество подводимой тепловой энергии; при достижении температуры порядка 400 - 450°С необходимо возобновить более интенсивный подвод тепла и закончить нагрев при достижении температуры порядка 600°С.

Таблица 2 – Термодинамический (термохимический) режим пиролиза лужги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной (массовое соотношение Г: Л = 1:2)

№ п/п	Количество подведенного тепла, кДж/кг	Температура пиролиза, °С	Примечание
1	0,420	150	
2	0,300	250	
3	0,210	320	Начало экзотермии
4	0,085	450	Экзотермия
5	0,380	600	Практически отсутствие экзотермии

Определение сорбционной способности по отношению к ионам Fe^{3+} (табл. 3) и органическим красителям – метиленовому голубому (МГ) и конго красному (КК) (табл. 4) определяли в динамическом режиме, масса сорбента 10,00 г. Композиционный сорбент использовали с дисперсностью $d > 200 \mu\text{м}$ и $67 < d < 200 \mu\text{м}$.

Таблица 3 – Зависимость динамической обменной емкости (ДОЕ) и удельной очищающей способности от дисперсности сорбента по отношению к ионам Fe^{3+}

V, мл	A	C ф-та, мг/л	ДОЕ, мг/г	Удельная очищающая способность сорбента, мг/г	Степень насыщения сорбента ионами Fe^{3+} , %
Фракция $d > 200 \mu\text{м}$					
0	0	0	0,01	0	0
25	0,17	1,2953		0,0052	25,9
50	0,66	4,9768		0,0147	99,5
75	1,39	4,9814		0,0001	99,6
Фракция $67 < d < 200 \mu\text{м}$					
0	0	0	0,05	0	0
100	0,03	0,1040		0,0001	2
200	0,04	0,2341		0,0001	5
300	0,07	0,4165		0,0002	8
400	0,13	0,9849		0,0006	20
500	0,25	1,9706		0,0010	39
600	0,57	4,6279		0,0027	93
700	0,58	4,7634		0,0001	95

Установлено, что сорбент фракции $d > 200 \mu\text{м}$ перестает работать при пропускании объема 75 мл, в то время как сорбент фракции $67 < d < 200 \mu\text{м}$ продолжает работать вплоть до 700 мл. По анализу значений динамической обменной емкости (ДОЕ) сделан вывод, что для очистки воды от ионов Fe^{3+} оптимально использовать композиционный сорбент с размером частиц $67 < d < 200 \mu\text{м}$. Для исследования сорбционной способности по отношению к органическим красителям (табл. 4), основываясь на предыдущих выводах, выбран сорбент с размером частиц $67 < d < 200 \mu\text{м}$, так как на сорбенте с размером частиц $d > 200 \mu\text{м}$ сорбция МГ и КК не эффективна. Сорбент фракции $d > 200 \mu\text{м}$ не удерживает МГ и КК из раствора. Установлено, что сорбент с размером частиц $67 < d < 200 \mu\text{м}$ способен очистить 1300 мл модельного раствора, содержащего МГ и 1500 мл модельного раствора, содержащего КК.

При оценке антибактериальной активности композиционных сорбентов выявлен тот факт, что соблюдается закон равновесной концентрации в процессе очистки питьевой воды от кишечной палочки опытными и контрольными образцами сорбционно-фильтрующих субстанций. Установлено, что 3 г опытного (гранулированный композиционный сорбент) и 3 г контрольного (сорбирующие компоненты сменной фильтрующей кассеты «БАРЬЕР-4» бытового фильтра для очистки воды) сорбентов способны адсорбировать 1 млрд 667 млн и 1 млрд КОЕ *Escherichia coli* соответственно. Определены параметры очистки воды, характеризующие эффективность адсорбции *Escherichia coli* разработанным композиционным сорбентом в динамических условиях. Установлено, что при фильтрации взвеси кишечной палочки со скоростью 10 мл/мин 1 г композиционного сорбента, он способен адсорбировать 556 млн КОЕ эшерихий. Сопоставляя полученные данные, становится очевидной повышенная эффективность адсорбции кишечной палочки экспериментальным композиционным сорбентом по сравнению с сорбентом – наполнителем кассеты «БАРЬЕР-4» в 1,7 раза. Объяснением повышенной эффективности адсорбционного действия композиционного сорбента, полученного при пиролизе растительных отходов агропромышленного комплекса Белгородской области, экранированных местными монтмориллонит содержащими глинами при очистке воды от представителей условно-патогенной микрофлоры, надо полагать является: высокая площадь удельной поверхности (до $200,0 \text{ м}^2/\text{г}$), мелкая зернистость гранул (от 67 до 200 мкм) и наличие микро- и макропор (общая удельная пористость $0,351 \text{ см}^3/\text{г}$).

Таблица 4 – Результаты определения динамической обменной емкости композиционного сорбента (фракция 67<d<200мкм) по отношению к органическим красителям: метиленовому голубому и конго красному

V, мл	A	C ф-та, мг/л	ДОЕ, мг/г	Удельная сорбционная способность, мг/г	Степень насыщения сорбента ионами Fe ³⁺ , %
МГ					
0	0	0	0,116	0	0
25	0,25	3,7282		0,0149	7
50	0,36	5,3580		0,0065	11
75	0,73	10,8450		0,0219	22
100	0,86	12,6854		0,0074	25
200	1,38	20,3909		0,0077	41
300	2,42	35,8420		0,0155	72
400	2,90	43,0404		0,0072	86
500	3,14	46,5046		0,0035	93
600	3,20	47,4715		0,0010	95
700	3,21	47,6569		0,0002	95
800	3,25	48,1967		0,0005	96
900	3,27	48,5363		0,0003	97
1000	3,28	48,6119		0,0001	97
1100	3,31	49,1577		0,0005	98
1200	3,35	49,7434		0,0006	99
1300	3,37	49,9926	0,0002	100	
КК					
0	0	0	0,093	0	0
25	0,56	12,7785		0,0511	26
50	1,23	28,1643		0,0615	56
75	1,55	35,3621		0,0288	71
100	1,66	38,0701		0,0108	76
200	1,74	39,9090		0,0018	80
300	1,81	41,5008		0,0016	83
400	1,84	42,0200		0,0005	84
500	1,86	42,4432		0,0004	85
600	1,87	42,8000		0,0004	86
700	1,89	43,1979		0,0004	86
800	1,89	43,1934		0,0000	86
900	1,90	43,3786		0,0002	87
1000	1,92	43,9962		0,0006	88
1100	1,95	44,7052		0,0007	89
1200	1,97	45,1283		0,0004	90
1300	2,06	47,0312	0,0019	94	
1400	2,17	49,5197	0,0025	99	
1500	2,18	49,7553	0,0002	100	

Таблица 5 – Влияние сорбентов на фенологию растений сои сорта «Ланцетная»

	Порошкообразный композиционный сорбент		Гранулированный композиционный сорбент	
	% растений в стадии развития			
	семядоли	2х настоящих листьев	семядоли	2х настоящих листьев
Контроль	37,5	62,5	37,8	62,2
Торнадо	85,7	14,3	75,7	24,3
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 50 г на 1 кг почвы	100,0	0	70,0	30,0
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 100 г на 1 кг почвы	50,0	50,0	40,0	60,0
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 150 г на 1 кг почвы	72,7	27,3	74,5	25,5
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 25 г и монтмориллонитовая глина, 25 г на 1 кг почвы	75,0	25,0	73,0	27,0
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 25 г и монтмориллонитовая глина, 50 г на 1 кг почвы	72,7	27,3	73,9	26,1
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 25 г и монтмориллонитовая глина, 100 г на 1 кг почвы	60,0	40,0	58,8	41,2

Проведенные эксперименты по детоксикации почвы от гербицида сплошного действия «Торнадо» (табл. 5) свидетельствуют о высокой эффективности разработанных композиционных сорбентов. Оптимальной дозой внесения гранулированного композиционного сорбента в почву является 100 г на 1 кг почвы, так как при данном соотношении 60 % модельных растений имеют два настоящих листа. Гранулированная форма композиционного сорбента предпочтительнее для детоксикации почвы от пестицидов, что обусловлено следующими факторами: за счет меньшей степени вымывания, гранулированный композиционный сорбент дольше находится в верхнем слое почвы, чем порошкообразный, и следовательно более пролонгированно и эффективно сорбирует пестицид; композиционный сорбент обладает высокой технологичностью, так как соответствует размеру посевной фильеры, следовательно, его можно вносить в почву одновременно с

семенами. Методом ИК-листовой диагностики экспериментально определено количество хлорофилла, флавоноидов и азотный статус в листьях модельных растений (соя сорта «Ланцетная») в контрольной группе - 28,94; 29,10 и 1,27 условных единиц dualex соответственно и при внесении пестицида Торнадо совместно с гранулированным композиционным сорбентом в почву - 28,5; 28,7 и 1,32 условных единиц dualex соответственно. Полученные данные свидетельствует о высокой эффективности связывания гербицида Торнадо, при его совместном внесении с экспериментальным сорбентом. Причем содержание хлорофилла, флавоноидов и азотный статус модельных растений остается на уровне контрольных.

Выводы

1. Разработаны физико-химические основы энергоэффективной технологии (за счет снижения температуры синтеза сорбционно-активных материалов на 300 - 350°C по сравнению с температурой, необходимой для получения традиционного активного угля) получения композиционных сорбентов на основе растительных отходов агропромышленного комплекса Белгородской области и местных монтмориллонит содержащих глин. Определены оптимальные параметры синтеза гранулированных (массовое соотношение компонентов глина: лузга – 1:1, температура изотермической стадии пиролиза 350 - 450°C) и порошкообразных (массовое соотношение компонентов глина: лузга – 1:2, температура изотермической стадии пиролиза 450 - 650°C) композиционных сорбентов.

2. Изучены процессы фазо- и структурообразования, протекающие при совместном пиролизе растительных отходов с монтмориллонит содержащими глинами. Выявлена стадийность процессов, протекающих при пиролизе: до 400°C начинают выделяться CO₂ и H₂O; 600°C – выделение смол; 800°C - выделение горючих газов (CH₄, CO, H₂). Установлено, что на протяжении всего процесса пиролиза лузги семян подсолнечника выделяется CO₂ в количестве 56,4 – 65,7 масс. % и CO в количестве 19,2 – 35,5 масс.%. Интенсивное выделение CH₄ начинается через 120 мин от начала термообработки и составляет 10,1 масс.%. Количество H₂ составляет 1,8 – 8,2 масс.%.

3. Дано термохимическое описание процессов фазообразования при пиролизе растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной. Установлено, что общее суммарное количество тепловой энергии, необходимое для осуществления процесса пиролиза, составляет 1,4 кДж на 1 кг композита.

4. Установлено, что в процессе пиролиза происходит обогащение поверхности кристаллической решетки монтмориллонита углеродом без изменения параметров элементарной ячейки.

5. Выявлены кинетические закономерности очистки модельных водных растворов от ионов тяжелых металлов (Fe^{3+}), органических красителей (метиленовый голубой (МГ) и конго красный (КК)), условно-патогенных бактерий (тест-культура *Escherichia coli* ATCC 25922) в статическом и динамическом режиме. Порошкообразные композиционные сорбенты имеют высокую сорбционную способность по отношению к ионам Fe^{3+} , которая достигает 97,07%, по отношению к метиленовому голубому достигает 82,6%. По анализу значений динамической обменной емкости гранулированных композиционных сорбентов сделан вывод, что для очистки воды от ионов Fe^{3+} и органических красителей (МГ и КК) оптимально использовать композиционный сорбент с размером частиц от 67 до 200 мкм. Доказано, что результативность адсорбции кишечной палочки при очистке инфицированной воды гранулированным композиционным сорбентом в 1,7 раза эффективнее комплексного сорбента коммерческой сменной фильтрующей кассеты «БАРЬЕР-4».

6. Определены параметры очистки воды, характеризующие эффективность адсорбции *Escherichia coli* разработанным композиционным сорбентом в динамических условиях. Установлено, что при фильтрации взвеси кишечной палочки со скоростью 10 мл/мин 1 г композиционного сорбента способен адсорбировать 556 млн КОЕ эшерихий.

7. Установлена высокая эффективность связывания гербицида Торнадо, при его совместном внесении с гранулированным композиционным сорбентом. Оптимальной дозой внесения гранулированного композиционного сорбента в почву является 100 г на 1 кг почвы.

8. Установлено, что благодаря своей низкой стоимости (150 руб за кг) разработанный композиционный сорбент найдет широкое применение в народном хозяйстве при очистке сточных и поверхностных вод, загрязненных условно-патогенной микрофлорой, тяжелыми металлами и органическими поллютантами.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-43-08021 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Zohra M, Rose J., Borschneck D. Urban Wastewater Treatment by Adsorption of Organic Matters on Modified Bentonite by (Iron-Aluminum). // *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 4, 2014. – pp.71-79.
2. Naddafi K., Mahvi A.M., Nasseri S., Mokhtari M., Zeraati H. Evaluation of the Efficiency of Clay Pots in Removal of Water Impurities. // *Iranian J Env Health Sci Eng*, V.2, № 2, 2005. pp. 12-16.
3. Ismadji S., Soetaredjo F.E., Ayucitra A. Clay Materials for Environmental Remediation. // *Springer Briefs*, 2015. 124 p.
4. Везенцев А.И., Трубицын М.А., Романщак А.А. Сорбционно-активные породы Белгородской области // *Горный журнал*, №1, 2004. С. 51-52.
5. Мухин В.М., Чебыкин В.В. Галкин Е.А. Активные угли. Эластичные сорбенты, катализаторы, осушители и химические поглотители на их основе. Каталог: Под общей ред. д.т.н. В.М. Мухина. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. 278 с.
6. Губин – Вель. Методы органической химии, Т II, методы анализа. Издание 2-е стереотипное. М.: Химия, 1967. 764 с.
7. Буханов В.Д., Везенцев А.И., Нгуен Хоай Тьяу, Покровский М.В., Шапошников А.А., Панькова О.Н., Соколовский П.В., Козубова Л.А., Жеребненко С.В. Влияние концентрации монтмориллонит содержащего сорбента и рН питательной среды на чувствительность *Esherichia Coli* к антибактериальным препаратам. // *Научные ведомости БелГУ. Серия Медицина и фармация*, №11(182), Выпуск 26/1, 2014 г. С. 209 – 212.
8. Везенцев А.И., Тохтарь В.К., Коробов В.А., Буханов В.Д., Перистый В.А., Соколовский П.В. Оптимизация условий синтеза композиционного сорбента. // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области сборник докладов, 2016. С. 101-118.
9. Везенцев А.И., Тохтарь В.К., Коробов В.А., Буханов В.Д., Перистый В.А., Соколовский П.В. Разработка композиционного сорбента. // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова, 2015. С. 92-103.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН

mail_michail@mail.ru

Глаголев С.Н., д-р. экон. наук, проф.,
Герасимов М.Д., канд. техн. наук., доц.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В статье изложены концептуальные вопросы формирования идеи и направлений исследования по гранту РФФИ: Разработка теоретических основ проектирования вибрационных модулей для технологических процессов сортировки, измельчения, уплотнения и погружения свай. Приведены основные результаты, полученные в ходе выполнения работы по созданию опытно-промышленных образцов инновационных вибрационных механизмов.

Ключевые слова: вибратор, вибрационные технологии, управление параметрами вибрации, асимметрия вынуждающей силы.

В производственной деятельности человека важнейшую роль играют технологические процессы, которые относятся к механическим, такие как измельчение, сортировка, перемешивание, уплотнение, формование и погружение конструктивных элементов, например свай и шпунтов в грунт. Все эти процессы в той или иной степени связаны с использованием принудительного генерирования колебаний, вибрации, рабочих органов механического оборудования и машин [1, 2,3,4]. Вибрационные процессы, применяемые в технике и в технологических процессах, давно уже выделились с самостоятельное направление исследований и применение в различных отраслях промышленности [5,6,7].

С одной стороны, все вибрационные процессы обладают общими основными параметрами: амплитуда, частота, фаза колебаний, масса колеблющегося тела, вынуждающая сила, точка приложения вынуждающей силы, форма и направление колебаний и др.

С другой стороны, схемы возбуждения вибрации, как процесса направленного на выполнение полезной работы, имеют столь широкий диапазон и принцип организации, что превращает отдельные

вибрационные механизмы: универсальные, специальные или уникальные [1,16,17,20,21].

Самое широкое распространение в технике, очевидно, получили универсальные дебалансные площадочные и глубинные вибраторы, которые создают при работе круговую вынуждающую силу, которая формирует круговые или эллиптические колебания [1,20]. Для выполнения целого ряда технологических процессов часто требуются, однако, направленные колебания. Для таких процессов чаще всего выполняется схема вибрационного механизма, состоящего из двух спаренных вибраторов с круговой вынуждающей силой. В таких вибрационных механизмах предусматривается гашение вынуждающих сил в одной плоскости и удвоение, сложение, этих сил в перпендикулярной плоскости. Вибрационные механизмы с направленными колебаниями получили определённое распространение. Однако, характерные особенности этих механизмов, не позволяют им более широкому распространению [4,6,20]. К таким особенностям следует отнести: необходимость синхронизации вращения дебалансных валов; необходимость увеличения габаритных размеров вибрационных механизмов по сравнению с одновальными вибраторами; наличие единственной точки приложения суммарной вынуждающей силы и единственного направления её действия.

Наряду с проблемой организации эффективных направленных колебаний существует ещё одно важное направление совершенствования вибрационных машин и механизмов. Проблема состоит в том, что для реализации ряда технологических процессов необходимо наличие не просто направленных колебаний, а таких колебаний, когда вынуждающая сила действует в основном в сторону выполнения непосредственной полезной работы. К таким процессам относятся, например, уплотнение грунта и асфальтобетонной смеси дорожными катками, подбрасывание сортируемого материала на просеивающей поверхности грохота и др. Наличие просто вынуждающей силы и направленных колебаний для таких процессов требует компенсации, гашения, её составляющей на «нерабочей», холостой стороне действия вынуждающей силы. Компенсация, гашение холостой составляющей вынуждающей силы, как правило, осуществляется путём присоединения к вибрационной системе дополнительной, достаточной для компенсации, массы, которая носит наименование – пригруз.

Учитывая наличие таких технических проблем, многими научные центры и научные коллективы ведут исследования, теоретическое

обоснование и создание более совершенных вибрационных механизмов и машин [2,3,4,5,6].

Выполненные исследования по гранту РФФИ №14-41-0843: «Разработка теоретических основ проектирования вибрационных модулей для технологических процессов сортировки, измельчения, уплотнения и погружения свай» были направлены на решение обозначенных проблем.

Создание одновального вибратора направленных колебаний.

За основу конструкции принят планетарный механизм с передаточным отношением внутреннего зацепления равным 2. В этом случае, точка зацепления делительной окружности шестерни при вращении совершает движение по прямолинейной траектории. Если в точку, расположенную на расстоянии радиуса делительной окружности расположить центр неуравновешенной массы, то такой механизм генерирует колебания вдоль прямой линии, направленные колебания. Реализация данной идеи [8,9,10,18] обеспечена теоретическими исследованиями и практическим исполнением вибратора. Одновальный вибратор направленных колебаний (рис. 1) обеспечивает

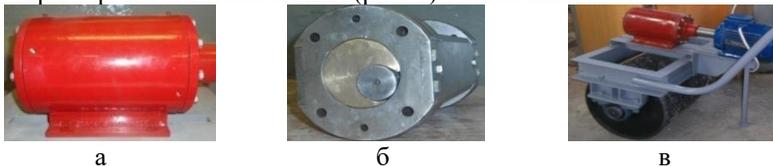


Рисунок 1 – Одновальный вибратор направленных колебаний
а – вибратор в сборе, б – виброкассета, в – испытательный стенд

получение направленных колебаний вдоль прямой линии [11,14,15]. С помощью поворотной в корпусе виброкассеты можно легко устанавливать любое направления действия вынуждающей силы в пределах 360 градусов.

Теоретическое обоснование и создание вибрационного механизма с асимметричной вынуждающей силой.

В основу теории создания вибрационного механизма с асимметричной вынуждающей силой было использовано положение о сложении гармонических колебаний [12,13,19]. Эта задача теоретически обратна задаче о разложении некоторого колебательного процесса с помощью ряда Фурье. Если единичный систематический удар, рис.2, который является наиболее эффективным при совершении работы, разложить в ряд Фурье, то мы получаем серию составляющих

гармонических колебаний, которые при сложении практически моделируют эффект удара [22].

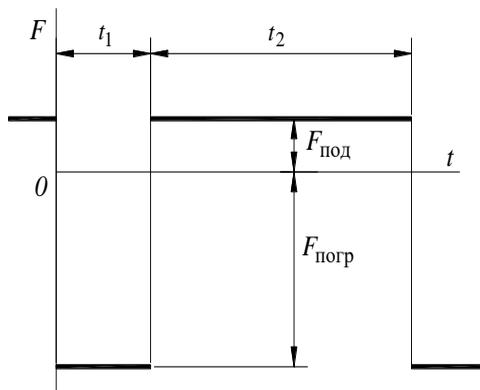


Рисунок 2 – Схема рабочего цикла вибратора с наличием асимметрии вынуждающей силы

В качестве примера приведём график, рис. 3, изменения вынуждающей силы вибрационного механизма с семью ступенями однонаправленных вибраторов направленного действия. Частота вращения валов составляет: $n = 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500$ об/м; масса дебалансов составляет: $m = 10, 7, 6, 5, 4, 3, 2$ кг; радиус смещения центра тяжести у всех дебалансов составляет 5 см.

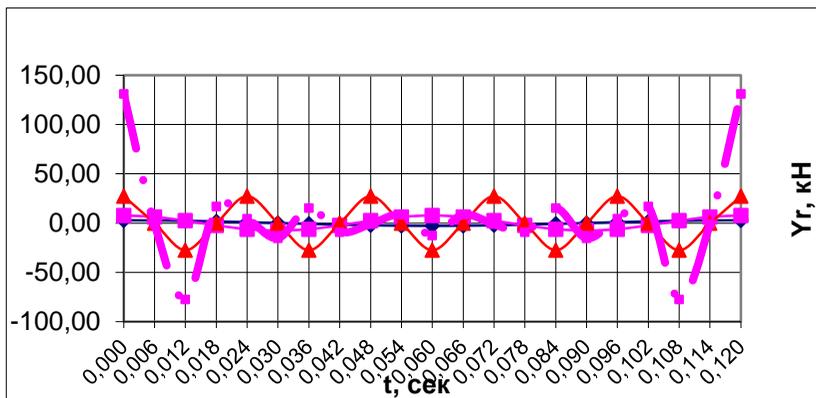


Рисунок 3 – График изменения суммарной вынуждающей силы при сложении действия семи ступеней вибраторов с направленными колебаниями.
 Y_r – вынуждающая сила, кН, t – время, с.

Из графика видно, что максимальное суммарное значение вынуждающей силы, в каждом периоде, составляет 131 кН в течение 0,012 с, а в продолжении остального времени периода, вынуждающая сила колеблется около нуля. Лишь на двух участках, в течение 0,012 с вынуждающая сила составляет (-77) кН. Таким образом, составляющая вынуждающей силы на холостом ходу существенно меньше составляющей на рабочем участке. При этом, график суммарной вынуждающей силы моделирует удар.

Вывод. В результате выполненной работы по теме гранта РФФИ №14-41-0843 достигнуты поставленные в работе цель и задачи научных исследований. Коллективом исполнителей получены решения теоретических задач создания принципиально новых для производства вибрационных механизмов, получены патенты на изобретения и полезные модели, разработана конструкторская документация на изготовление опытно-промышленных образцов вибрационных механизмов, опытно-промышленные образцы изготовлены в металле и испытаны в лабораторных и натуральных условиях. При выполнении гранта создана уникальная лаборатория «Инновационные вибрационные технологии и машины», которая используется в учебном процессе и научных исследованиях. На международном салоне «Архимед - 2015» однофазный вибратор направленных колебаний, созданный в ходе выполнения гранта, удостоен золотой медали.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08043 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т./Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1981. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавандела. 1981. 509 с., ил.
2. Вайсберг Л.А., Акимов А.В., Иванов К.С. Новые методы моделирования и расчёта вибрационных грохотов и грохотов-сепараторов. Сб. С. 651 – 658
3. Надутый В.П., Лапшин Е.С. Кинетика грохочения с переменным вибровозбуждением по длине просеивающей поверхности. Сб. С.11-18
4. Жулай В.А. Машины для свайных работ. Конструкции и расчеты: учеб. пособие, Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. Воронеж, 2011. 216с

5. Огурцов В.А., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе цепей Маркова// Строительные материалы. 2008. №5. С. 33-35
6. Кустарев В.Г. Анализ факторов, влияющих на качество процесса уплотнения / Г.В. Кустарев, С.А. Попов, П.Е. Жарцов // Механизация строительства. 2013. №4. С. 6-10.
7. Кустарев Г.В. Теоретическое обоснование управляемого воздействия на уплотняемую среду / Г.В. Кустарев, С.А. Попов // Вестник МАДИ. 2007. №3. С. 59-62.
8. Gerasimov M.D., Mkrtychev O. V., Stepanistchev V. A., Sevost'yanov V. S. Calculation of Main Kinematic Characteristics of the Single-Shaft Vibrator with Aimed Fluctuations // Research Journal of Applied Sciences. 2014. №9: С. 855-861.
9. Gerasimov M.D., Glagolev S.N., Gerasimov D.M., Mkrtychev O.V. Determination Of The Driving Force's Asymmetry Factor And The Vibrostand's Work's Analysis// International Journal of Applied Engineering Research. 2015. №24 С. 45392-45398
10. Gerasimov M.D., Mkrtychev O.V., Glagolev S.N., Gerasimov D.M., Lатышев S.S. Method of determination of vibrating screens oscilation's amplitude in a characteristic point for plane motion// ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Т.11, № 20. С. 12295-12301.
11. Герасимов М.Д., Мкртычев О.В., Герасимов Д.М. Методика определения величины разбалансировки направленных колебаний планетарного вибратора // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 1. С. 107-110.
12. Герасимов М.Д. Сложение колебаний в вибровозбудителях// Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 3. С. 116-120
13. Герасимов М.Д., Герасимов Д.М., Степанищев В.А. Методика проведения исследований вибрационного устройства с асимметричной вынуждающей силой // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 9. С. 125-130.
14. Герасимов М.Д., Мкрытчев О.В. Теория и численное решение задачи плоскопараллельного движения просеивающей поверхности вибрационного грохота с ассиметричным вибровозбуждением// Механизация строительства. 2016. Том 77. № 8. С. 9-12.
15. Герасимов М.Д., Мкрытчев О.В., Старчак Ю.Ю., Таламанов П.Н. Разбалансировка направленных колебаний планетарного вибратора// Строительные и дорожные машины. 2016. №9. С. 20 – 26.
16. Герасимов М.Д. Инновационные вибрационные технологии, машины и оборудованием. Опыт НИОКР // «Мир дорог». 2015-2016. С. 31-32.
17. Глаголев С.Н., Герасимов М.Д., Кабалин Д.П. Направление совершенствования вибрационных грохотов // Мир дорог. 2016-2017. С.61-64.
18. Герасимов М.Д. Латышев С.С., Герасимов Д.М. Физическая модель

- вибрационной мельницы на базе однофазного вибратора с направленными колебаниями // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2016. Вып. XV. С.54-58.
19. Герасимов М.Д., Герасимов Д.М., Степанищев В.А., Мкртычев О.В. Результаты экспериментальных исследований работы вибростенда с ассиметричной вынуждающей силой. Научные технологии и инновации (XXII научные чтения): Междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 2016. Ч. 1. С. 24-26.
 20. Герасимов М.Д., Легейда В.А., Андреев И.Е. Анализ рынка вибрационных механизмов ярославльского завода «Красный маяк». Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред. В.С. Богданова. – Белгород, 2016. Вып. XV. С.63-66.
 21. Герасимов М.Д., Легейда В.А., Андреев И.Е. Методика определения технических параметров виброплит на этапе проектирования// Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2016. Вып. XV. С.59-63.
 22. Герасимов М.Д., Воробьев Н.Д., Герасимов Д.М., Степанищев В.А. Исследование многоступенчатого вибрационного механизма с направленными колебаниями каждой ступени// Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 3. С. 88-93.

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

dva_vadjik1975@mail.ru

Дороганов В.А., канд. техн. наук, доц.,
Дороганов Е.А., канд. техн. наук, проф.,
Перетоккина Н.А., канд. техн. наук, доц.,
Онищук В.И., канд. техн. наук, доц.,
Трепалина Ю.Н., канд. техн. наук,
Гавшина О.В., аспирант

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

Аннотация. В работе проведены исследования искусственных керамических вяжущих на основе сырья различного состава. Установлены закономерности уплотнения композитов, в зависимости от условий формования вяжущих и исходя из типа исходного сырья. Проведены исследования различных типов дисперсных модифицирующих добавок для плотных огнеупорных бетонов и выявлены основные закономерности влияния их на основные физико-механические характеристики. Показана возможность использования данных материалов для получения высокоплотных керамических композитов огнеупорного и радиационно-защитного назначения.

Ключевые слова: глинозем, цирконий, искусственные керамические вяжущие, высококонцентрированные керамические вяжущие, огнеупоры, плотность, радиационно-защитные материалы.

Развитие современной промышленности способствуют созданию новых композиционных материалов, характеризующихся высокими эксплуатационными свойствами в экстремальных условиях. Существующие в настоящее время современные композиты, независимо от способа их получения, представляют собой гетерогенный системы, состоящих из различных компонентов, которые могут отличаться по химическому составу и физическим свойствам [1, 2]. Данное различие по свойствам во многих случаях отрицательно сказывается на основных характеристиках композита, что приводит к снижению качества и долговечности материалов. Одной из задач, по повышению эффективности работы материалов в экстремальных условиях, является достижение максимальной плотности, которая

достигается путем формирования оптимальной структуры, характеризующейся высокими значениями эксплуатационных характеристик. Этот метод осуществляется путем использования различных технологических приемов: изменение типа матриц, применение высокого давления формования, повышенных температур термообработки, использование рационального зернового состава наполнителя и матрицы, высокого химического и фазового сродства керамического вяжущего и заполнителя и т. д. [3, 4]. Одним из перспективных направлений совершенствования методов создания высокоплотных керамических материалов является технология, основанная на использовании дисперсных искусственных керамических вяжущих (ИКВ), которые уже на стадии получения обеспечивают оптимальную упаковку частиц твердой фазы с минимальной усадкой после сушки и термообработки, а также характеризующееся повышенной механической прочностью [5].

В данной работе использовались искусственные керамические вяжущие на основе различных техногенных монокристаллических и поликристаллических материалов корундового и циркониевого составов [6-9]. Получение ИКВ осуществляли методом мокрого помола с постадийной догрузкой материала в условиях повышенной концентрации твердой фазы, основные свойства которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Свойства полученных ИКВ

№ п/п	Исходное сырье	Плотность, кг/м ³	Объемная концентрация твердой фазы, %	Относительная влажность, %	Содержание частиц менее 100 нм, %
1	Корунд (монокристаллический) ¹	2740	0,58	18	0,2
2	Корунд (поликристаллический) ²	2300	0,43	23	0,7
3	γ - глинозем	2100	0,45	25	1,1
4	Цирконий (поликристаллический) ³	3620	0,58	14	0,8
5	Цирконий (монокристаллический) ⁴	3700	0,6	13	0,4

- ¹измельченные кристаллы сапфиры;
- ² α -глинозем, полученный путем обжига γ -глинозема при 1200 °С;
- ³измельченные кристаллы фианита, стабилизированного Y_2O_3 ;
- ⁴диоксид циркония химически чистый.

При создании плотной структуры керамических материалов стремятся полностью удалить дисперсионную среду и достигнуть минимального содержания газовой фазы (воздух) в материале путем оптимизации зернового состава системы, применением внешних воздействий высокотемпературного спекания. В процессе постадийного синтеза ИКВ за счет механохимического воздействия происходит измельчение частиц твердой фазы, зерновой состав которой стремится в область оптимального зернового распределения, которая способствует формированию плотной упаковки полидисперсных частиц [10-13].

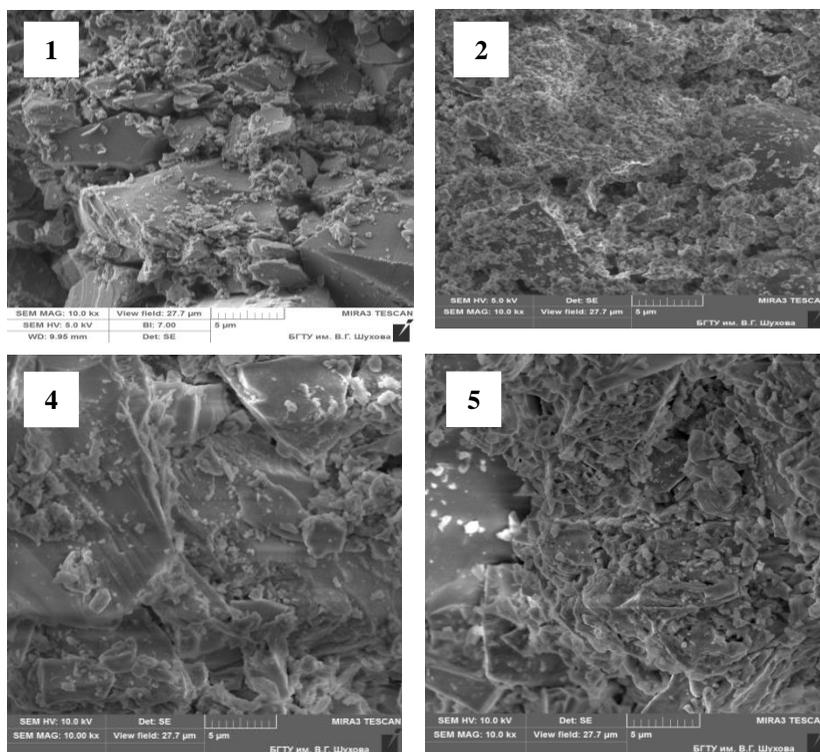


Рисунок 1 – Микрофотографии высушенных образцов на основе различных ИКВ (обозначения см. табл. 1).

Сравнительный анализ структуры образцов из ИКВ поли- и монокристаллического составов показывает существенную разницу в дисперсном составе частиц твердой фазы. Монокристаллические материалы, характеризующиеся прочным каркасом зерен, измельчаются с большей затратой энергии и времени, что приводит к большому разбросу по диаметру частиц, по сравнению с поликристаллическими ИКВ (рис. 1).

Уплотнение ИКВ в активных (гипсовых) формах приводит к незначительному снижению плотности систем, по сравнению с исходной плотностью суспензией (табл. 1), за счет частичного удаления дисперсионной среды (свободно связанной воды) и отмечался набор исходной прочности (до 3 МПа) образцов (рис. 2).

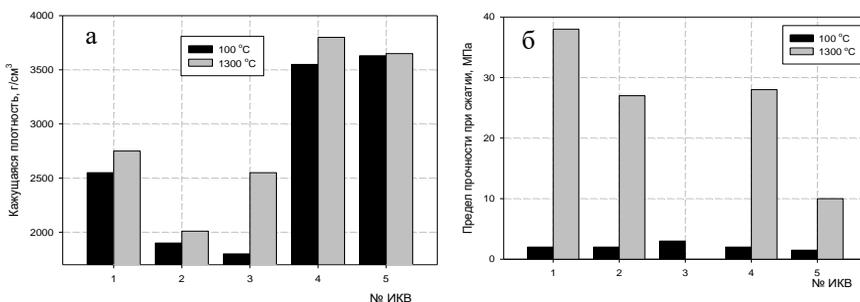


Рисунок 2 – Диаграммы значений кажущейся плотности (а) и предела прочности при сжатии (б) образцов ИКВ (см. табл. 1) после сушки и обжига при 1300 °С

Уплотнение материала наблюдается после термообработки при высокой температуре (начиная с 1200-1300 °С). Это происходит в результате удаления на начальной стадии химически связанной вода, а затем за счет начала частичного спекания сопровождающегося усадочными явлениями (до 7 %), при этом наблюдается интенсивный рост прочности образцов в десятки раз. На значительный рост прочности существенное влияние оказывает процесс спекания, который происходит на контактном уровне за счет образования жидкой фазы на поверхности частиц в результате расплавления активных нанодисперсных частиц, о чем свидетельствуют микрофотографии образцов ИКВ на основе поликристаллического корунда (рис. 3), характеризующиеся максимальной прочностью.

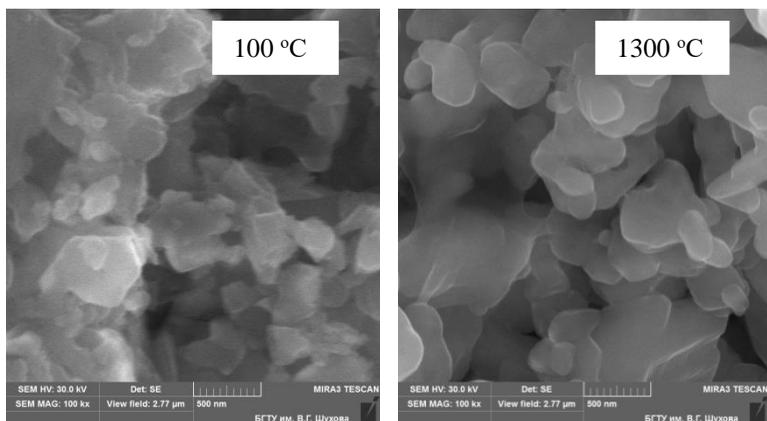


Рисунок 3 – Микрофотографии образцов на основе ИКВ монокристаллического корунда после сушки и обжига.

Одним из способов уплотнения материалов является сочетание дисперсной фазы (вяжущего) и беспористого плотного заполнителя полидисперсного состава. В этом случае появляется возможность создания на основе ИКВ композиционных материалов повышенной плотности в результате применения различных способов уплотнения (литье, вибропрессование, статическое формование и т.д.). В результате подбора оптимальной концентрации суспензии на основе ИКВ корунда поли- и монокристаллического состава в сочетании с монокристаллическим корундовым наполнителем возможно увеличение плотности до $3040\text{-}3270 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от типа исходной суспензии (рис. 4), что на 16-34 % выше чем у образцов без наполнителя. Максимальная плотность материала соответствует 30-35 %-й концентрации вяжущего при использовании вибро- или полусухого формования, а методом вибролитья содержание вяжущего меньше 50 % невозможно использовать в силу плохой подвижности массы и поэтом максимальная плотность составляет не более 2600 кг/м^3 . Образцы на основе ИКВ монокристаллического состава характеризуются более значительным ростом (на 20 %) прочности с повышением концентрации заполнителя до 70 % в следствии наличия в системе бездефектных частиц оптимального зернового состава с повышенной прочностью.

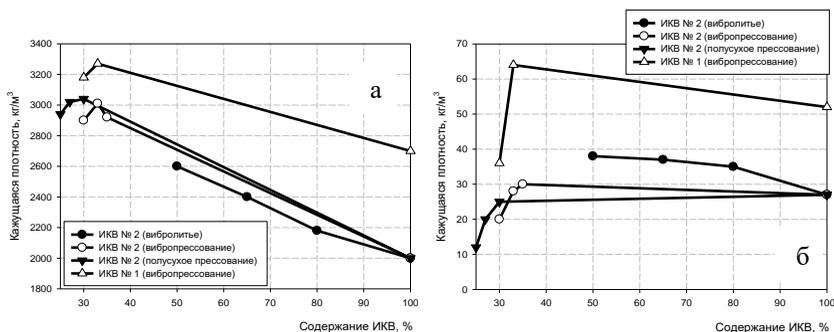


Рисунок 4 – Изменение плотности (а) и прочности (б) образцов композитов корундового состава, термообработанных при 1300 °С, от содержания вяжущего (см. табл. 1) при различных способах уплотнения.

При уплотнении композита циркониевого состава на основе поликристаллической ИКВ (табл. 1) методом вибропрессования происходит разрыхление структуры за счет полиморфного перехода из моноклинной в стабильную кубическую модификации, что приводит к снижению прочности материала (рис. 5). Для устранения данного эффекта целесообразной использовать метод стабилизации путем дополнительного введения CaO в количестве до 5 %. Использование стабилизированной ИКВ приводит к увеличению прочности в 2,5 раза при концентрации вяжущего 27 %. Максимальная плотность материала, при этой концентрации вяжущего, практически не отличается от

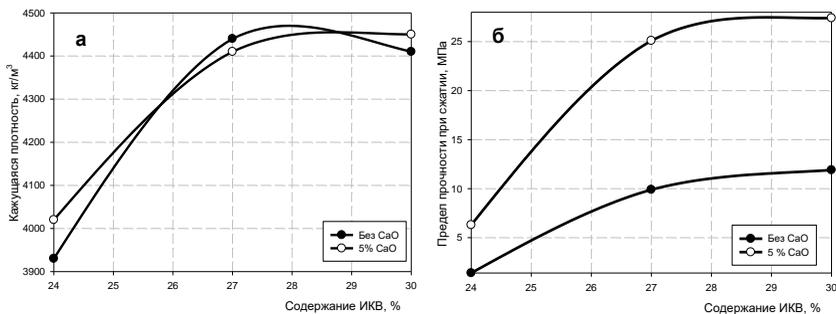


Рисунок 5 – Зависимость кажущейся плотности (а) предела прочности при сжатии (б) образцов циркониевых композитов от содержания ИКВ поликристаллического состава, термообработанных при 1300 °С.

составов на основе нестабилизированной ИКВ и находится в пределах 4400-4450 кг/м³, что на 15 % выше чем у отливок на основе суспензии без наполнителя (рис.3).

Такими образом, в результате проведенных исследований было установлено, что для синтеза искусственных керамических вяжущих, используемых при создании керамических композитов с повышенной плотностью, целесообразно использовать стабилизированное поликристаллическое сырье. Показано, что изменяя параметры синтеза ИКВ и условия (режимы) уплотнения возможно существенным образом влиять на физико-механические характеристики материалов на их основе. В результате этого возможно получить уплотненные композиционные материалы циркониевого и глиноземистого состава огнеупорного и технического назначения.

Сочетание двух оксидных систем Al₂O₃ и ZrO₂ дает возможность получения матриц с совокупными свойствами данных материалов (высокая плотность и огнеупорность, стойкость к агрессивным средам и испарению в вакууме, и т.д.), которые позволят создать новые огнеупорные композиты с набором уникальных свойств. Материалы на основе системы Al₂O₃-ZrO₂ получают с помощью плавления этих двух оксидов при высоких температурах. В связи с выше изложенным в данной работе исследовались, как смешанные системы на основе отдельно полученных искусственных вяжущих циркониевого и глиноземистого состава, так и керамические дисперсные системы синтезированные на основе корундоциркониевого состава с добавкой оксида кремния. В качестве исходных материалов для получения ИКВ использовались стабилизированный оксид циркония, глинозем в стабильной α-модификации и бакора-33 (содержание ZrO₂ – 33 %). Свойства полученных дисперсных систем представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Свойства ИКВ

Исходный материал	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Время истечения, сек	Содержание частиц более 63 мкм, %
ZrO ₂	3,72	18,5	21	0,7
α-Al ₂ O ₃	1,89	26,0	50	-
Бакор-33	2,90	15,5	136	5,2

Были исследованы смешанные системы, состоящие из ИКВ глинозема и циркония, содержание которых изменялось с шагом 10 %. На основе данных составов изготавливались образцы, а затем

обжигались при 1300 °С с последующим определением основных физико-механических характеристик, которые представлены на рис. 6.

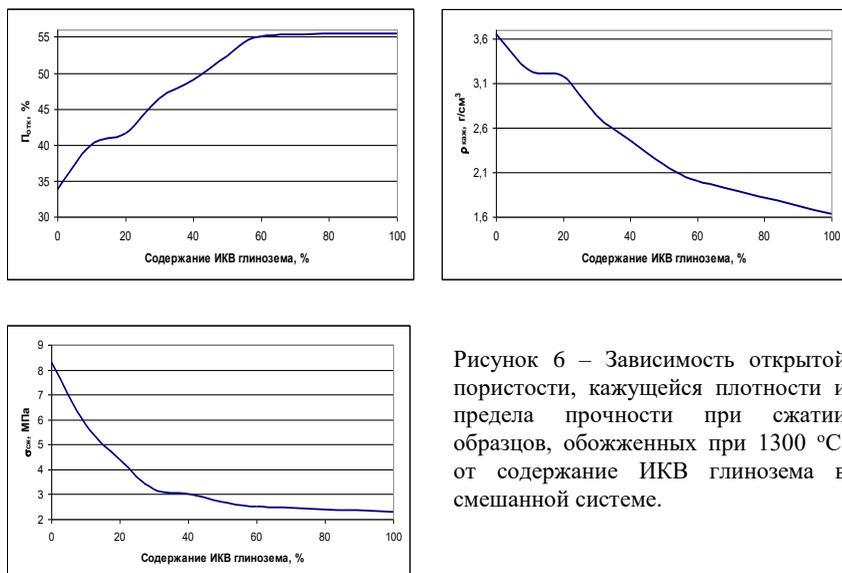


Рисунок 6 – Зависимость открытой пористости, кажущейся плотности и предела прочности при сжатии образцов, обожженных при 1300 °С, от содержания ИКВ глинозема в смешанной системе.

Из анализа представленных зависимостей следует, что повышение концентрации ИКВ глинозема в смешанной систем и соответствующие снижение содержание ИКВ циркония приводит к существенному повышению открытой пористости образцов практически в 1,5 раза (рис. 4). При этом кажущаяся плотность снижается более чем в 2 раза (рис. 5), а предел прочности при сжатии уменьшается в 4 раза (рис. 6). Это свидетельствует о том, что смешанная система характеризуется постоянством фазового состава и не происходит образование новых фаз. Ухудшение физико-механических характеристик с повышением содержания ИКВ глинозема, что свидетельствует об отсутствии процесса спекания при данной температуре. Для активизации спекания в системе необходимо наличие дополнительной более легкоплавкой фазы чем основные составляющие смешанной системы, например SiO₂ как у электроплавленных бадделеитокорундовых материалов. Для подтверждения данного факта были проведены сопоставительные исследования смешанной системы, содержащей аналогичную концентрацию оксида циркония как у ИКВ на основе Бакора-33 (33 % ZrO₂). По мимо оксидов алюминия и циркония в бакоре присутствует

около 10-12 % аморфной фазы SiO₂. В табл. 3 представлены сравнительные характеристики образцов смешанной системы на основе ИКВ глинозема и циркония, а также образцов на основе ИКВ бакора, обожженных при 1300 °С.

Таблица 3 – Свойства образцов

Показатель	ИКВ смешанного состава	ИКВ Бакора-33
Содержание:		
ZrO ₂	33	33
SiO ₂	-	11
Al ₂ O ₃	67	56
Открытая пористость, %	47	21
Кажущаяся плотность, г/см ³	2,62	2,93
Предел прочности при сжатии, МПа	3	17
Огневая усадка при 1300 °С, %	1,5	3,2

Из данных таблицы следует, что при одинаковом содержании оксида циркония, но при наличии в ИКВ бакора оксида кремния и соответствующим снижении оксида алюминия приводит с существенному улучшению физико-механических характеристик образцов при данной температуре. Исходя из данных, представленных в таблице следует, что для композитов корундо-циркониевого состава предпочтительно использовать в качестве вяжущего ИКВ на основе Бакора-33. Для подтверждения этого были исследованы композиционные огнеупорные материалы пластического формования, состоящие из корундо-циркониевого полидисперсного наполнителя и 30 % вяжущего, состоящего из 21 % ИКВ на основе Бакора-33 и 9 % пластифицирующей добавки огнеупорной глины латненского месторождения. Основные физико-механические характеристики образцов корундо-циркониевых композитов после термообработки при 1300 °С представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Физико-механические характеристики корундо-циркониевых композитов

Содержание компонентов, %			Физико-механические характеристики			
Заполнитель	ИКВ бакора	Глина	Потк, %	$\rho_{\text{каж.}}$, г/см ³	$\sigma_{\text{сж.}}$, МПа	Огневая усадка, %
70	21	9	17,8	2,91	40	2

В результате установлено, что при использовании смешанной системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ на основе индивидуальных глиноземистого и циркониевого вяжущих при повышении концентрации ИКВ глинозема происходит существенное снижение плотности (практически в 2 раза) суспензии и отливки на ее основе, при этом пористость увеличивается в 1,5 раза, а прочность уменьшается практически в 4 раза. Показано, что при получении искусственного вяжущего корундо-циркониевого состава на основе аморфно-кристаллического бадделеита корунда (бакора) происходит формирование полидисперсной системы с дилатантным характером течения. Выявлено, что при сопоставимой концентрации оксида циркония около 30-33 % у суспензии на основе бакора плотность на 25 % выше чем у смешанной $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, при этом прочность отливок в 4 раз больше, а пористость в 2 раза ниже. Установлено, что при использовании вяжущего на основе бакора-33 и полидисперсного наполнителя аналогичного состава, возможно получать при низких давления формования (до 1 МПа) керамический огнеупорный композит, модифицированный дисперсной глиной, характеризующийся высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками после предварительного обжига при 1300 °С.

Высокоплотные огнеупорные композиты на основе гидравлического вяжущего широко используются для изготовления материалов и изделий, применяемых во многих отраслях промышленности. Одним из существенных недостатков таких бетонов является их разупрочнение в высокотемпературной области, что существенным образом снижает качество изделий в процессе эксплуатации. Для уменьшения данного эффекта стремятся понизить общую концентрацию оксида кальция в системе путем снижения содержания высокоглиноземистого цемента в бетонной массе. Этот подход реализуется в сверхнизкоцементных и ультранизкоцементных бетонах, в которых содержание CaO находится в пределах 0,2-2,5 %. При этом в определенных случаях практически полностью устраняется

эффект разупрочнения при высоких температурах, но низкое содержание цемента отрицательно сказывается на прочностных характеристиках изделий в области низких температур (до 600°C). Для повышения прочностных характеристик изделий на основе огнеупорных бетонов с низким содержанием CaO после сушки используют различные тонкодисперсные модифицирующие добавки импортного производства, которые способствуют улучшению реологических свойств бетонной массы и повышению плотности системы [14].

Одной из перспективных добавок в огнеупорные бетоны, по свойствам аналогичной импортным, может стать дисперсные системы на основе искусственных керамических вяжущих различного состава. В данной работе была проведена сопоставительная оценка импортных добавок в виде табулярного (Т60/Т64), реактивного (СТС) и диспергирующего (M-ADS 3) глиноземов, а также ИКВ глиноземистого состава (табл. 1, № 2) [15, 16].

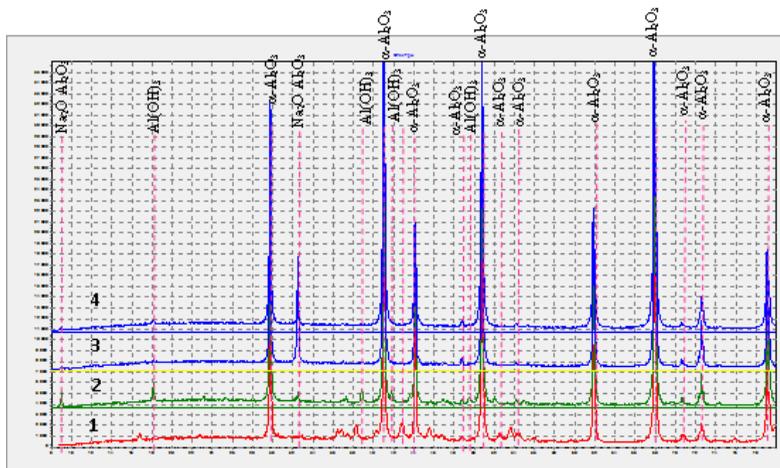


Рисунок 7 – Рентгенограммы дисперсных систем: 1 - ИКВ; 2 - M-ADS 3; 3 – СТС; 4 -Т60/Т64.

Из анализа рентгенограммы представленной на рис. 7 следует, что основной кристаллической фазой всех исследуемых дисперсных добавок является мелкокристаллический α - Al_2O_3 в виде корунда. В качестве примеси в импортных добавках наблюдается наличие кристаллических фаз алюмината натрия, который влияет на сроки

схватывания гидравлических вяжущих. Следует отметить, что диспергирующий глинозем отличается присутствием в своем фазовом составе гидроксида алюминия в виде минерала бемита.

С помощью метода лазерной гранулометрии были проанализированы зерновые составы импортных глиноземистых дисперсных добавок в сравнении ИКВ глиноземистого состава, результаты которых представлены на рис. 8. Анализ представленных данных показал, что реактивный глинозем характеризуется максимальным средним медианным диаметром (d_m) 10 мкм, при этом коэффициент полидисперсности (K_n) составляет 4,8 и максимальное сжатие частиц около 16 мкм. Табулярный глинозем представляет собой полидисперсную систему с максимальным значением $K_n = 5,8$, медианным диаметром 3 мкм и максимальной концентрацией частиц 2,8 – 4 мкм.

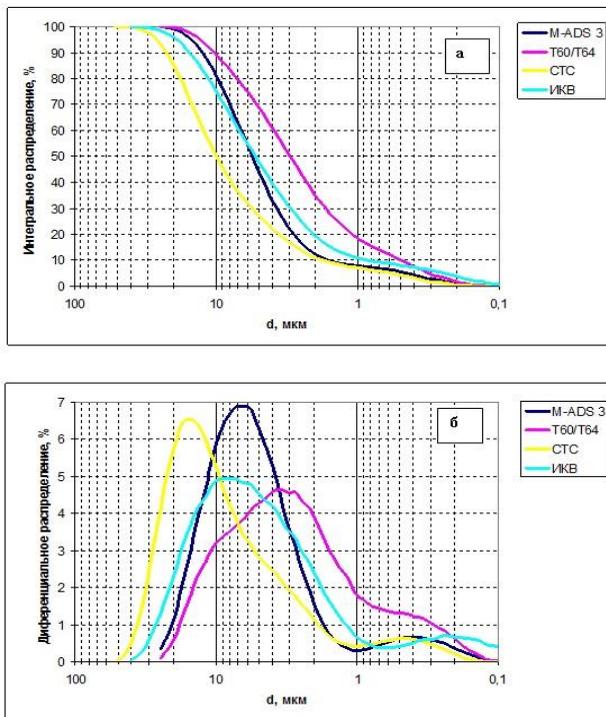


Рисунок 8 – Интегральное (а) и дифференциальное (б) распределение частиц дисперсных систем.

При анализе зернового распределения диспергирующего глинозема установлено, что при среднем медианном диаметре 5,5 мкм характеризуется минимальным значением коэффициента полидисперсности 3,5 и максимальным содержанием частиц 6-7 мкм.

При анализе искусственного керамического вяжущего с импортными дисперсными системами выявлено, что ИКВ отличается высокой степенью полидисперсности $K_{п} = 5,7$, сопоставимым со значениями табулярного глинозема. Средний медианный диаметр ИКВ также аналогичен Т60/Т64 и составляет 5,5 мкм, при этом в системе максимальной концентрацией характеризуются частицы с диаметром 7-10 мкм. Следует отметить, что отличительной особенностью зернового распределения ИКВ является наличие 0,5 % частиц диаметром менее 0,1 мкм (100 нм), что существенным образом повышает удельную поверхность системы.

Далее была проведена сопоставительная оценка влияния исследуемых дисперсных систем на основные физико-механические характеристики образцов огнеупорных бетонов до и после термообработки при 1300 °С. Образцы изготавливались методом выдолбить в металлические формы из составов, содержащих 10 % высокоглиноземистого цемента и 90 % полифракционного корундового заполнителя, в котором тонкодисперсная фракция (менее 0,63 мкм) заменялась дисперсными добавками в количестве 0,5-10 %. Результаты определения основных физико-механических характеристик приведены на рис. 9-10.

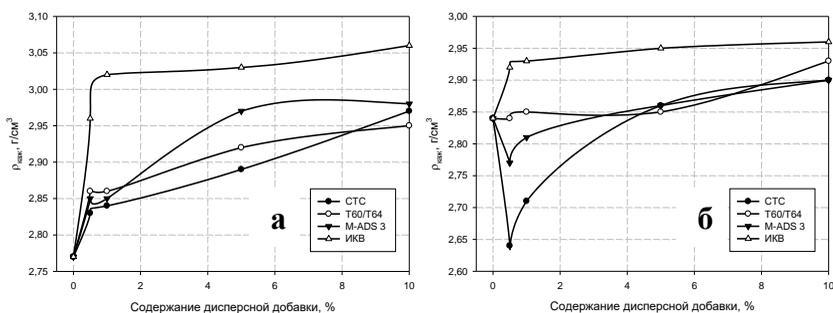


Рисунок 9 – Зависимость кажущейся плотности образцов огнеупорных бетонов после сушке при 100 оС (а) и обжига при 1300 °С (б) от содержания дисперсных добавок.

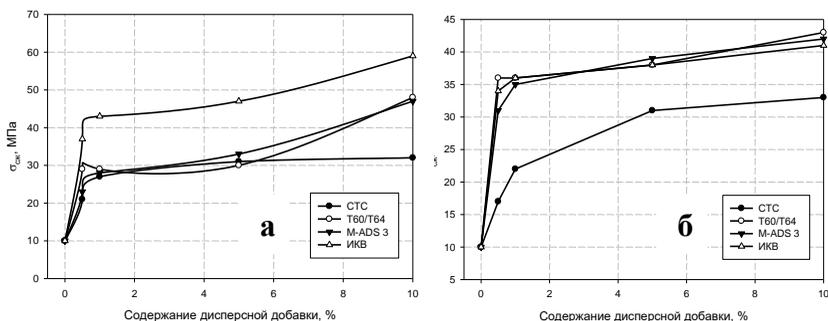


Рисунок 10 – Зависимость предела прочности при сжатии образцов огнеупорных бетонов после сушки при 100 °С (а) и обжига при 1300 °С (б) от содержания дисперсных добавок

Анализ приведенных данных показал, что при введении дисперсных добавок в состав огнеупорного бетона приводит к увеличению плотности образцов на 5-10 % как после сушки, так и после термообработки.

Максимальной плотностью 2,95-3,05 г/см³ характеризуются образцы с добавкой искусственного керамического вяжущего глиноземистого состава. Следует отметить, что повышение концентрации добавок в составах огнеупорных бетонов приводит к резкому увеличению (до 4-6 раз) механической прочности образцов. При этом повышенными значениями прочности (до 60 МПа) характеризуются образцы с добавкой ИКВ.

В результате при анализе дисперсных систем установлено, что широко распространенные модифицирующие керамические дисперсные добавки импортного производства для огнеупорных систем на основе гидратационных вяжущих в основном содержат 98-99 % α -Al₂O₃ и 0,3-1,4 % Na₂O. По фазовому составу они характеризуются наличием в основном тонкодисперсной фазы корунда с незначительной примесью алюминатов натрия, а также гидроксида алюминия. Установлено, что при использовании ИКВ в качестве модифицирующей добавки к огнеупорным бетонам, происходит более эффективное уплотнение системы и существенный рост прочности, по сравнению с аналогичными импортными добавками. Из выше изложенного можно сделать вывод, что дисперсная система на основе ИКВ глиноземистого состава может быть эффективно использована в качестве аналога

импортным дисперсным добавкам и может быть рекомендовано для промышленного внедрения.

Для создания материалов способных одновременно выдерживать механические нагрузки, воздействия химически активных атомов и радикалов, различного рода излучений в наибольшей степени подходят композиты, получаемые на керамических связках [17]. Поэтому на данном этапе работы основное внимание было уделено созданию высокоглиноземистых ИКВ и композитов на их основе, которые, предположительно должны радиационно-защитной способностью. Была предпринята попытка использования в качестве модификаторов добавок нанодисперсного кремнезема. С целью повышения радиационно-защитных свойств керамических материалов была изучена возможность сочетания высокоглиноземистой керамической матрицы и заполнителя на основе оксида висмута (Bi_2O_3). Для этого были изучены составы с различным содержанием от 50 до 100% оксида висмута (Bi_2O_3). В последнем случае в качестве связки использовали дисперсный кремнезем торговой марки «Ludox» (зарегистрированная торговая марка «Ludox» компании «GRACE Davison»). Составы исследуемых формовочных смесей представлены в табл. 5

Таблица 5 – Составы радиационно-защитных материалов на основе Bi_2O_3

№ п/п	Содержание компонентов, %		Содержание структурирующей добавки «Ludox», % (сверх 100 %)	Формовочная влажность, %
	ИКВ высокоглиноземистого шамота (75 % Al_2O_3)	Bi_2O_3		
1	50,0	50,0	-	7,0
2	25,0	75,0	3,5	5,5
3	-	100,0	6,5	4,7

На основе представленных в табл. 5 составов методом статического прессования с удельным давлением 100 МПа были отформованы образцы, которые подвергались сушке при 100-110°C и обжигу при температурах в интервале 760 – 850°C. После обжига были определены основные физико-механические характеристики, которые представлены на рис. 11-12.

Из представленных данных видно, что максимальной плотностью 7,5 г/см³ характеризуется состав на основе 100 % Bi_2O_3 , термообработанный при 800°C. При этом композит на связке из нанодисперсного кремнезема отличается минимальной прочностью. Максимальной плотностью и прочностью характеризовались образцы

композиата состава 50% Bi_2O_3 и 50% ИКВ на основе высокоглиноземистого шамота.

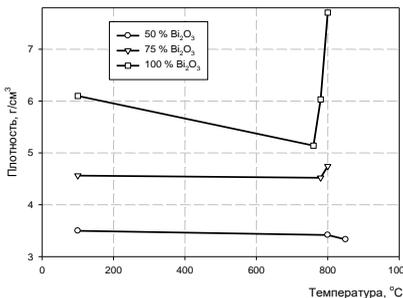


Рисунок 11 – Зависимость плотности образцов с различным содержанием Bi_2O_3 от температуры обжига.

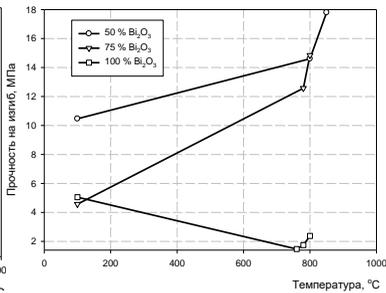


Рисунок 12 – Зависимость прочности образцов с различным содержанием Bi_2O_3 от температуры обжига.

Характер кривых изменения плотности и прочности в зависимости от температуры спекания свидетельствует об образовании при температурах около 800°C расплава, при одновременном осуществлении процессов полиморфизма, синтеза новых фаз. Для подтверждения данного факта был проведен рентгенофазовый анализ образцов, обожженных при разных температурах. В результате было установлено, что при нагревании состава на основе 100% Bi_2O_3 со связкой на основе дисперсного раствора кремнезема происходит образование силиката висмута. При термообработке составов с 75 и 50% Bi_2O_3 происходит разложение муллитовой составляющей шамотной части на Al_2O_3 и SiO_2 и наблюдается также образование силикатов висмута.

Таким образом, наиболее эффективным висмутсодержащим композитом является состав 50% оксида висмута и 50% высокоглиноземистой ВКВС. Данный состав характеризуется широким интервалом спекания, плотностью около 3500 кг/м³, пределом прочности при изгибе до 18 МПа.

Далее были изучены радиационно-защитные характеристики композиционных материалов по методу геометрии узкого пучка, результаты которых представлены в табл. 6.

Таблица 6 – Линейный коэффициент ослабления μ , см^{-1} точечного гамма-источника (узкий пучок) для композитов

Номер состава (см. табл. 5)	Средняя плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Энергия излучения, кэВ						
		60	122	166	392	511	661	1120
1	3420	122,2	35,3	29,7	7,4	4,38	2,15	0,73
2	4750	138,2	41,2	33,2	8,3	5,11	2,22	0,79
3	6060	155,6	45,0	37,8	9,4	5,58	2,73	0,93

В результате установлено, что максимальным линейный коэффициент ослабления при энергии излучения 60-1120 кэВ обладает керамический композит со средней плотностью более $6000 \text{ кг}/\text{м}^3$, полученный на основе оксидов висмута с использованием нанодисперсной кремнеземистой связки. Однако, как показано ранее, он характеризуется невысокими прочностными показателями. По физико-механическим свойствам лучшим результатам имеют композиты на высокоглиноземистой керамическом вяжущем с плотностью $4750 \text{ кг}/\text{м}^3$ и прочностью на изгиб до 14 МПа.

В результате проведенных исследований выявлены основные закономерности формирования композиционных керамических радиационно-защитных материалов на основе алюмосиликатных искусственных вяжущих с добавками наномодификаторов и оксидов тяжелых металлов. Изучены основные физико-механические и эксплуатационные характеристики радиационно-защитных материалов и выявлены оптимальные составы и параметры синтеза композитов.

Таким образом в данной работе установлено, что использование поликристаллического сырья для получения ИКВ способствует более интенсивному синтезу ультрадисперсных частиц за счет наличия дефектной структуры, по сравнению с монокристаллическим сырьем, что способствует процессу спекания при более низких температурах. Выявлены основные закономерности уплотнения керамических композиционных материалов на основе ИКВ корундового и циркониевого составов в зависимости от состава и способа уплотнения. Показано, что оптимальная структура композитов формируется при использовании вибропрессования, что способствует созданию материала с максимальной плотностью. Показано, что при синтезе корундоциркониевых композитов эффективно применять ИКВ бадделеитокорундового состава, модифицированного огнеупорной глиной, что позволяет при низких удельных давления формования

формировать высокоплотный огнеупорный материал с повышенными термомеханическими свойствами. Установлено, что ИКВ глиноземистого состава по химическому, фазовому и зерновому составу сопоставимы с традиционным модифицирующим добавкам импортного производства (табулярный, реактивный и диспергирующий глиноземы) и могут быть эффективно использованы для производства плотных огнеупорных бетонов на основе гидравлических вяжущих. Выявлены основные закономерности формирования фазовой структуры и свойств радиационнозащитных керамических композитов, на основе алюмосиликатного ИКВ с добавкой оксида висмута, характеризующихся повышенной плотностью и обладающих высокой степенью радиационной защиты, которые могут эксплуатироваться при повышенных температурах.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-43-08046 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Пивинский Ю.Е. Неформованные огнеупоры: Справочное издание: В 2-х томах. Т 1. Книга 1. Общие вопросы технологии. М.: Теплоэнергетик, 2003. 448 с.
2. Пивинский Ю. Е. Керамические вяжущие и керамобетоны. М.: Металлургия, 1990. 270 с.
3. Пивинский Ю. Е. Новые огнеупорные бетоны. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1996. 148 с.
4. Дороганов В.А., Евтушенко Е.И. Огнеупорные керамобетоны. Монография. Saarbrucken: LAB LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. 188 с.
5. Круглицкий Н.Н., Пивинский Ю.Е. Влияние стабилизации и коагуляции на дилатансию минеральных суспензий // Химическая технология. 1981. № 1. С. 22 – 24.
6. Пивинский Ю.Е., Дабига А.А., Ульрих В.И. и др. Изучения шликерного литья керамики на основе стабилизированного ZrO_2 , полученного методом химического соосаждения// Огнеупоры 1986. № 1. С. 24 – 28.
7. Пивинский Ю.Е., Бевз В.А. Получение водных циркониевых суспензий и исследование их реологических, технологических и вяжущих свойств// Огнеупоры 1979. № 8. С. 38 – 43.
8. Doroganov V.A., Doroganov E. A. Bel'maz N. S. Timoshenko K. V., Trepalina Yu. N., Peretokina N. A., Nemets I. I., Zuev A. S., Evtushenko E.

- I. Development and study of composite refractory materials based on modified dispersed systems// *Refractories and Industrial Ceramics*. 2009. Volume 50, Number 6. p. 431-437.
9. Doroganov V.A. Aspects of the modification of refractory concrete with nanosilica// *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011. Volume 52, Number 6. p. 409-413.
 10. Пивинский Ю.Е. Реология дилатантных и тиксотропных дисперсных систем. С–Петербург. РИО СПбГТИ (ТУ), 2001. 174 с.
 11. Пивинский Ю.Е. Керамические и огнеупорные материалы. Избранные труды. Том 2. С–Петербург. Стройиздат СПб.: 2003. 688 с.
 12. Каплан Ф.С., Пивийский Ю.Е. Реологические и коллоидно–химические свойства керамических дисперсных систем// *Химия и технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов*. Л.: Наука, 1989. С. 125 – 141.
 13. Пивинский Ю.Е., Митякин П.Л. Реологические и вязущие свойства высокоглиноземистых суспензий// *Огнеупоры*. 1981. № 5. С. 48 – 52.
 14. Дороганов В.А. Особенности модифицирования огнеупорных бетонов нанокремнеземом// *Новые огнеупоры*. 2011. № 11. С. 45-49.
 15. Евтушенко Е.И., Перетокина Н.А., Дороганов В.А., Сулейманова Л.А., Сыса О.К., Бедина В.Ю., Миженина О.В. Теплоизоляционные материалы на основе искусственных керамических вязущих различного состава// *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013. № 6. С. 149-151.
 16. Дороганов В.А., Дороганов Е.А., Перетокина Н.А., Онищук В.И., Трепалина Ю.Н., Гавшина О.В. Использование искусственных керамических вязущих в технологии высокоплотных керамических композитов/ Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области // *БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 9-10 апреля 2015 г.)*, Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 127-137.
 17. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Дороганов В.А., Евтушенко Е.И. Термические свойства алюмосодержащего композиционного материала, обладающего радиационно-защитными свойствами// *Огнеупоры и техническая керамика*. 2015. № 9. С. 27-29.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КАК СРЕДСТВО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

tanduun@mail.ru

**Дуюн Т.А., д-р техн. наук, доц.,
Гринек А.В., канд. техн. наук, доц.,
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.,
Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Проведено моделирование процесса резания в трехмерной постановке задачи с учетом изменяющихся физико-механических свойств материала и заготовки. Предложены функциональная схема системы управления скоростью резания и алгоритм управления, реализация которых осуществлена на основе базы данных разрушения материала и температурных полей и направлена на изменение интенсивности тепловых потоков, теплового и напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя изделия. Предложена аппроксимация результатов моделирования нейронными сетями с целью их использования при построении нечетких систем управления. Определены статические эмпирические зависимости показателей износа инструмента и шероховатости поверхности от технологических режимов для ряда марок труднообрабатываемых материалов в расширенном диапазоне скоростей резания и проведена оптимизация технологических режимов. Определена динамика процесса резания, при условиях входа и выхода инструмента из зоны резания. Результаты численного моделирования аппроксимированы нейронной сетью, описывающей связь технологических режимов с вектором выходных параметров: сил и температуры в зоне резания со скоростью и подачей. Разработана модель нечеткого вывода скорости резания. Разработана базовая компьютерная модель нечеткого управления технологическими режимами для тестирования предполагаемого подхода в управлении режимами, и проведены исследования ее динамики. Проведена идентификация процесса резания, получены описания передаточных функций объекта управления в операторном виде. Предложены схемы адаптивной системы управления

температурно-силовым состоянием в зоне резания на основе нечеткой логики.

Ключевые слова: математическое моделирование, механическая обработка, технологический процесс, численные модели, оптимизация, нечеткая логика, управление качеством.

Белгородский регион является одним из промышленных центров, широко представленным машиностроительными предприятиями. В Белгородской области машиностроение и металлообработка являются одной из важнейших промышленных отраслей, количество поставщиков и производителей составляет около 280 предприятий различного формата и сферы деятельности. Из них около 80 занимаются производством машиностроительных изделий. Научные исследования по тематике гранта №14-41-08044 вызваны необходимостью фундаментальных исследований технологических процессов механической обработки и теоретического обоснования новых подходов к управлению процессами резания. В рамках выполнения проекта предложен подход к разработке теоретических основ и методологии определения параметров состояния поверхностного слоя изделия и управления им при механической и отделочно-упрочняющей обработке, основанный на интегральном сочетании математического моделирования температурного поля и поля механических напряжений в зоне резания с автоматическим управлением режимами резания, что требует применения методов численного моделирования упруго-пластических деформаций для изотропных и анизотропных материалов.

Целями и задачами выполнения проекта являлись: комплексное управление вектором показателей качества изделия, формирующихся в процессе механической обработки и повышение производительности механической обработки труднообрабатываемых материалов за счет интеграции контроля, результатов имитационного моделирования и автоматического управления процессом. Фундаментальная задача, на решение которой направлен проект, состоит в модификации аналитических зависимостей, отражающих динамику температурного поля и поля механических напряжений в зоне резания, на основе которой синтезируются алгоритмы управления процессом резания, обеспечивающие требуемые параметры качества обрабатываемой поверхности с учетом технологической наследственности, что порождает неполную определенность в задаче управления. Задачей являлась также разработка элементов систем управления технологическими режимами механической обработки с

использованием программно-аппаратных средств для обеспечения заданных параметров качества обрабатываемого изделия.

В ходе решения задач проекта использовались: численные методы решения задач напряженно-деформированного состояния, методы планирования эксперимента и регрессионный анализ, метод имитационного моделирования, оригинальные разработанные методы идентификации объектов. Имитационные модели позволяют описать процесс механической обработки с учетом динамики, случайных воздействий на процесс и изменения граничных условий в процессе обработки. Оригинальный подход к описанию объекта управления, заключающийся в использовании нейронных сетей со многими связями между входными и выходными параметрами. Предложена концепция реализации автоматической системы управления процессом резания с нечеткой моделью вывода величины управляющего воздействия, позволяющая избежать ресурсоемких функциональных вычислений и эффективного управления приводами металлорежущего оборудования. Разработана методика контроля геометрических показателей качества изделий, состоящая в аппроксимации формы обрабатываемой поверхности на основе измеряемых геометрических параметров. Для получения эмпирических зависимостей, связывающих показатели качества с технологическими режимами применяя рототабельное композиционное планирование второго порядка.

Указанные подходы обладают существенными признаками новизны, что подтверждено полученными патентами на прикладные разработки по этой теме: патенты РФ на изобретения №2561405 и №2592464.

На основе проведенного имитационного моделирования процесса резания определен вектор внутренних параметров процесса резания, позволяющих установить взаимосвязи между управляющими и управляемыми переменными, используемыми при проектировании автоматизированных систем управления станочными системами. Выявлен характер динамической составляющей процесса резания, установлено влияние режимов резания на температуру в зоне резания, силовые характеристики процесса и состояние инструмента при резании. Определены взаимосвязи между тепловым и напряженным состоянием детали в процессе обработки и погрешностью формы. Разработана функциональная и структурная схема управления процессом резания по температурному критерию. Управление тепловыми параметрами позволяет обеспечивать требуемую точность формы и качество поверхностного слоя детали. Определен подход к

проектированию автоматической системы управления на основе аппроксимирующей нейронной сети и нечеткого регулирования управления приводом.

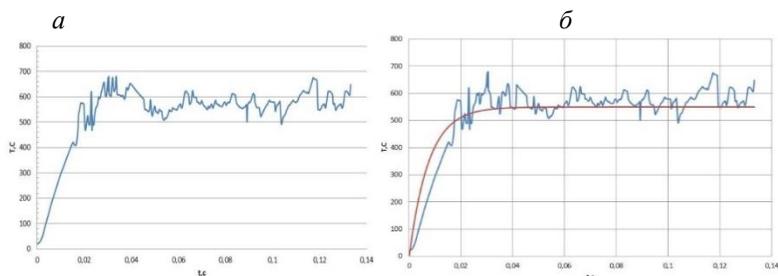


Рисунок 1 – Кривые разгона по каналу «скорость резания – температура»: *а* – экспериментальная, *б* – экспериментальная с наложением аппроксимированной, имитирующей сглаживание

Получены графические зависимости параметров резания от технологических режимов с учетом физико-механических свойств материала инструмента и детали как функции времени (рис.1). Учитывая, что в процессе резания температура в зоне резания, как правило, изменяется случайным образом (см. рис.1, *а*), применение классического метода идентификации требует предварительной фильтрации случайного сигнала с целью его сглаживания (см. рис.1, *б*), а это вносит дополнительную погрешность и усложняет процедуру получения математической модели объекта. В связи с этим разработан оригинальный метод идентификации слабоформализованного объекта, основанный на совмещении классического подхода и применении модели в форме нейронных сетей, построенных на основе естественных входных и выходных сигналов объекта. Методика реализации предложенного метода идентификации состоит из следующих этапов:

1. Анализ объекта исследования и сбор информации о входных и выходных переменных. На данном этапе проводится определение входных и выходных переменных объекта, характер изменений которых записывается при сборе статистических данных в режиме его нормального функционирования.

2. Построение модели в форме динамических нейронных сетей, где в качестве структуры нейронной сети предложено использовать нелинейную авторегрессионную сеть с экзогенными входами, при этом обучение нейронной сети осуществляется путем серии экспериментов с сигналами, записанными в процессе функционирования объекта (1-й

этап), в результате чего устанавливаются параметры сети. Для объектов исследования, описываемых уравнениями в частных производных, используется сеть с добавлением звеньев дробного запаздывания.

3. Получение результирующей математической модели в форме передаточной функции по каналам управления объекта осуществляется путем анализа отклика нейронной сети на стандартные входные воздействия. Наиболее простым и эффективным является подача на входы сети функции Хевисайда и аппроксимации отклика с помощью метода Симою (в случае идентификации объекта целого порядка) или модифицированного метода Симою (для объекта дробного порядка).

Модель объекта представима в форме передаточной функции дробного порядка вида:

$$W(s) = K\bar{W}(s) = K \frac{b_m s^{m/2} + b_{m-1} s^{(m-1)/2} + \dots + b_1 s^{1/2} + 1}{a_n s^{n/2} + a_{n-1} s^{(n-1)/2} + \dots + a_1 s^{1/2} + 1},$$

где коэффициент K находится как отношение амплитуд выходного и входного сигналов в установившемся режиме, а коэффициенты $a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_m$ находятся из следующих систем уравнений:

$$\begin{aligned} C_1 - \mu_0 &= 0; & a_1 &= b_1 + C_1; \\ C_2 - \mu_0 C_1 - \mu_1 &= 0; & a_2 &= b_2 + b_1 C_1 + C_2; \\ & \vdots & a_3 &= b_3 + b_2 C_1 + b_1 C_2 + C_3; \\ & & & \vdots \\ C_k - \mu_{k-1} - \sum_{i=0}^{k-2} \mu_i C_{k-1-i} &= 0, & a_k &= b_k + C_k + \sum_{i=1}^{k-1} b_i C_{k-i}. \end{aligned}$$

Для нахождения коэффициентов μ_k , используется вспомогательная функция $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \frac{d^{1/2}}{dt^{1/2}} (1 - \bar{h}(t)) \quad \Phi(s) = L\{\varphi(t)\} = \sqrt{s} \frac{1 - \bar{W}(s)}{s} = \frac{1 - \bar{W}(s)}{\sqrt{s}},$$

где коэффициенты μ_k , называемые моментами вспомогательной функции, находятся рекуррентно по формуле:

$$\mu_k = \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k \Phi(v)}{dv^k} \right|_{v=0}$$

Результаты моделирования для тестовой задачи приведены на рис. 2:

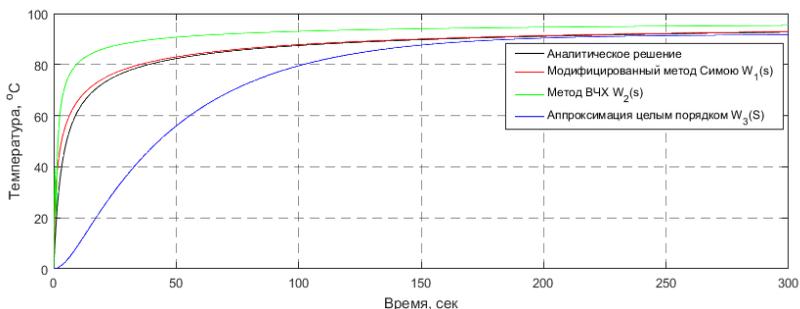


Рисунок 2 – Переходные характеристики изменения температуры нагрева, полученные различными методами идентификации

На основании приведенных переходных характеристик получены передаточные функции, приведенные ниже:

$$W_1(s) = 100 \frac{902.84s + 7.53s^{0.5} + 1}{1857.74s^{1.5} + 906.94s + 10.06s^{0.5} + 1},$$

$$W_2(s) = 100 \frac{0.45s - 1.09s^{0.5} + 0.97}{3.69 \cdot 10^{-5} s^{1.5} + 8.9 \cdot 10^{-3} s + 0.12s^{0.5} + 1}$$

Разработана структурная схема системы управления режимами резания по температурному критерию, обеспечивающая требуемое качество поверхностного слоя (рис.3).

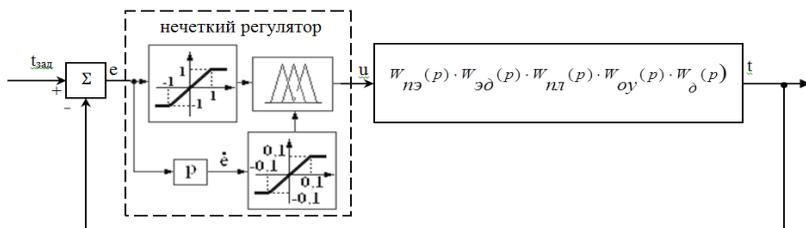


Рисунок 3 – Структурная схема системы автоматического управления процессом резания с нечетким регулятором

Анализ динамики нелинейной нечеткой системы управления, проведенной методом Гольдфарба, показал отсутствие автоколебаний в

системе, а графическая интерпретация, приведенная на рис.4, демонстрирует асимптотический характер устойчивости системы.

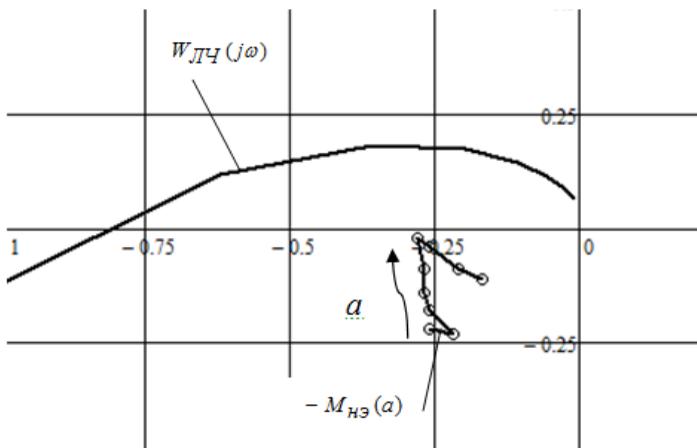


Рисунок 4 – Графическая интерпретация метода гармонического баланса Гольдфарба

На рис.4 представлены комплексная частотная характеристика $W_{лч}(j\omega)$ линейной части системы и обратная амплитудная характеристика $-M_{нэ}(a)$ нелинейной части (нечеткого регулятора), взятая с обратным знаком, что вытекает из условия нахождения системы на грани устойчивости в соответствии с критерием Найквиста:

$$W_{нэ}(a)W_{лч}(j\omega) = W_p(a, j\omega) = -1$$

откуда следует

$$W_{лч}(j\omega) = -\frac{1}{W_{нэ}(a)} = -M_{нэ}(a),$$

где $W_{лч}(j\omega)$ определяется как

$$W_{лч}(j\omega) = V(\omega) + jV(\omega)$$

Научные результаты, направленные на обеспечение высокопроизводительного процесса обработки, базируются на положениях физики, материаловедения, теории резания, теории нечетких множеств и нейронных сетей. Результаты исследований весьма значимы для научно-методического обеспечения процесса

обучения в магистратуре и тесно связывают смежные области науки: технологии машиностроения, теорию резания и теорию автоматического управления.

Применение зависимостей управления нечетких регуляторов в автоматическом управлении в сочетании с зависимостями, полученными на основе аппроксимирующих функций, позволяет существенно упростить процедуру подстройки регулятора традиционной системы автоматизированного управления и обеспечивает повышение качества. Суть такого подхода может быть использована применительно к системам управления механической обработкой. В современных многоосевых станках с ЧПУ существует системы управления точностью положения рабочего органа. Конструкторская документация по таким системам и оборудованию чаще всего является закрытой и носит коммерческий характер. Эффективность применения нечеткой логики в подобных системах. Разработаны устройства, реализующие управление точностью обработки через управление технологическими режимами. Однако, за редким исключением, отсутствуют попытки комплексно связать температуру и силу резания как взаимосвязанные параметры. При описании объекта управления используются эмпирические регрессионные модели, параметры которых не принадлежат к диапазонам режимов высокопроизводительной обработки и не могут быть использованы для ряда современных обрабатывающих центров.

На основе комплекса полученных имитационных, эмпирических и динамических математических моделей найдены оптимальные технологические параметры, соответствующие заданным критериям качества обрабатываемого изделия. Разработаны компьютерные программы, моделирующие нечеткие законы управления технологическими режимами. Промоделирована динамика функционирования нечеткого регулирования процесса резания с учетом взаимосвязи векторов входных и выходных переменных.

Решения поставленных задач выполнены на мировом уровне, о чем свидетельствуют опубликованные статьи в журналах, рекомендованных ВАК, изданиях, индексируемых в наукометрической системе Scopus, полученные патенты на изобретения, 2 защищенные диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08044 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Bushuev D.A., Rubanov V.G., Velichko D.V. Dynamic simulation of combined extremum-seeking control system for grinding-mixing unit automatic vibration suppression. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11, No. 20: 12288 - 12294.
2. Duyun, T.A. Grinek A.V., Rubanov V.G. Application of numerical simulation and neural network models for machining process control. *International Journal of Pharmacy & Technology*. 2016. Vol. 8, No.4: 22515-22524.
3. Бешевли О.Б., Дуюн Т.А. Эмпирические модели шероховатости поверхности при фрезеровании баббита // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. №7. С.122-127.
4. Бешевли О.Б., Дуюн Т.А. Оптимизация технологических параметров при фрезеровании баббита в условиях ремонтной обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. №8. С.142-147.
5. Тимофеев С.П., Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В. Методика измерения формы наружной поверхности крупногабаритных деталей – тел вращения опор технологических барабанов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. №20 (9). С. 35-45.
6. Дуюн Т.А., Гринек А.В. Математическое моделирование процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на основе нейросетевых и нечетких моделей // *Вестник современных технологий*. 2016. №3. С. 28-33.
7. Дуюн Т.А., Бешевли О.Б. Оптимизация технологических режимов фрезерования поверхности скольжения крупногабаритных подшипников с использованием специального оборудования // *Вестник современных технологий*. 2016. №4. С. 40-46.
8. Дуюн Т.А., Пчёлкин В.М., Сахаров Д.В. Исследование стойкости и шероховатости поверхности при фрезеровании легированной стали // *Вестник современных технологий*. 2016. №4. С. 47-51.
9. Магергут В.З., Рубанов В.Г., Чуев А.В. Формализация и анализ дискретных организационно-технологических систем со структурированными агентами на индикаторных сетях // *Белгород, Изд-во БГТУ*, 2016. 156 с.
10. Рубанов В.Г., Юдин Д.А., Бажанов А.Г., Магергут В.З., Кариков Е.Б., Кошлич Ю.А., Белоусов А.В. *Зеленые технологии: практические приложения* / Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 115 с.
11. Пат. 2 592 464. Способ идентификации сложного объекта управления дробного порядка / Е.Б. Кариков, В.Г. Рубанов, Т.А. Дуюн, А.В. Гринек; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «БГТУ им. В.Г. Шухова»; №2015115546/08 заявл. 23.04.2015; опубл.: 20.07.2016. Бюл. № 20.

12. Duyun T.A., Grinek A.V., Rubanov V.G., Kalatozishvili I.V. Controlling Of Thermal Parameters For Mechanical Treatment On The Basis Of Numerical Modeling Of Their Thermal Relationship. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. № 5. Vol. 10. P. 12371-12382.
13. Пат. 2561405 Российской Федерация. Стенд и способ исследования движения робокара / Рубанов В.Г., Рыбин И.А., Кижук А.С., Дуюн Т.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" - № 2013104803/11; заявл. 05.02.2013; опубл. 27.08.2015. Бюл. №24 - 5 стр.
14. Лозовая С.Ю., Бешевли О.Б., Дуюн Т.А., Воробьев Н.Д. Повышение эффективности ремонтной обработки опорных узлов крупногабаритных вращающихся агрегатов // Вестник Иркутского государственного технического университета им. В.Г. Шухова. 2015. №7. С. 60-66.
15. Рубанов В.Г., Титов В.С., Бобырь М.В. Адаптивные системы принятия нечетко-логических решений: монография / Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 237 с.
16. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Управление тепловыми параметрами процесса механической обработки с использованием численного моделирования их тепловых зависимостей. Промышленные контроллеры АСУ. №10, стр. 43-50.
17. Duyun T.A., Grinek A.V., Manzhos R.V. The Optimum Cutting Speed and Acceptable Parameters for Tool Vibration When Turning an Inhomogeneous Material. AdvancesbyEnvironmentBiology. 8(13): 112-116.

**СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА СО
СВОЙСТВАМИ ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА НА ОСНОВЕ
СИСТЕМЫ $ZrO_2-SrTiO_3-BiScO_3$**

ivanov.oleg@bsu.edu.ru

**Иванов О.Н., д-р физ.-мат. наук, снс,
Суджанская И.В., канд. физ.-мат. наук,
Даньшина Е.П., канд. физ.-мат. наук,
Любушкин Р.А., канд. хим. наук,
Япынцев М.Н.,
Васильев А.Е.**

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

Аннотация. В статье приведены основные научные результаты, полученные за весь период выполнения проекта РФФИ № 14-41-08032, посвященного разработке керамического композиционного материала на основе системы $ZrO_2-SrTiO_3-BiScO_3$, предназначенного для использования в качестве твердого электролита. Также указаны возможные направления применения результатов в науке, технике и образовании.

Ключевые слова: твердые электролиты, ионная проводимость, сегнетоэлектрический фазовый переход, диэлектрическая релаксация.

Целью работы по проекту РФФИ № 14-41-08032 является получение керамического композиционного материала на основе системы $ZrO_2-SrTiO_3-BiScO_3$, обладающего высокой ионной проводимостью и предназначенного для использования в твердооксидных топливных элементах, выявление закономерностей фазо-и структурообразования в процессе синтеза в зависимости от состава и условий получения, установление взаимосвязи между особенностями состава, структуры и свойств материала и его электропроводностью, обусловленной транспортом ионов кислорода.

Исследования последних лет показали перспективность использования в качестве твердого электролита слоистой (условно двумерной) гетероструктуры на основе стабилизированного диоксида циркония со структурой флюорита и титаната стронция с кубической

решеткой типа перовскита ABO_3 [1-3]. Было показано, что проводимость этой двухфазной системы не зависит от толщины слоев и выдвинуто предположение, что транспорт ионов кислорода осуществляется преимущественно вдоль границ раздела ZrO_2 - $SrTiO_3$ и обусловлен сильным разупорядочением кислородной подрешетки вблизи межфазной границы.

Существенно, что структурную неупорядоченность $SrTiO_3$, способствующую высокой ионной проводимости, можно значительно увеличивать и контролировать, создавая, например, твердые растворы на основе двух- или многокомпонентных систем, одним из компонентов которой является сам $SrTiO_3$, а другие компоненты в узлах А и В структуры перовскита ABO_3 содержат химические элементы, ионные радиусы которых сильно отличаются от ионного радиуса Sr (для узла А) и Ti (для узла В). В этом случае развитие структурной неупорядоченности может приводить и к появлению химической (и связанной с ней фазовой) неоднородности.

Новизну научного подхода, развиваемого в настоящем проекте, составляет переход от уже известной двухкомпонентной системы ZrO_2 - $SrTiO_3$ к принципиально новой трехкомпонентной системе ZrO_2 - $SrTiO_3$ - $BiScO_3$, в которой введение третьего компонента $BiScO_3$ обеспечивает увеличение структурной неупорядоченности, способствующей повышению ионной проводимости композиционной керамической системы ZrO_2 - $SrTiO_3$ - $BiScO_3$ по границам раздела компонент ZrO_2 и $SrTiO_3$ - $BiScO_3$. Высокая ионная проводимость была экспериментально обнаружена в слоистых (двумерных) образцах системы ZrO_2 - $SrTiO_3$. Для комплексного изучения особенностей свойств и структуры системы ZrO_2 - $SrTiO_3$, а также ZrO_2 - $SrTiO_3$ - $BiScO_3$, в настоящем проекте были изучены объемные керамические материалы, в которых также возможно обеспечить формирование поверхностей раздела между фазами ZrO_2 и $SrTiO_3$ ($SrTiO_3$ - $BiScO_3$).

При выполнении проекта были получены следующие основные результаты:

- Лабораторная технология получения экспериментальных образцов, позволяющая получать керамический материал с необходимым набором фаз, соответствующий фазам компонент ZrO_2 и ($SrTiO_3$ - $BiScO_3$). Основные технологическими операции - синтез исходных порошков, компактирование и спекание.
- Определение фазового состава и особенностей кристаллической структуры экспериментальных образцов. Основными фазами являются кубическая фаза ZrO_2 с пространственной группой симметрии $Fm\bar{3}m$ и

смеси кубической ($Pm\bar{3}m$) и тетрагональной ($P4mm$), образующейся в системе $SrTiO_3$ - $BiScO_3$ (рис. 1).

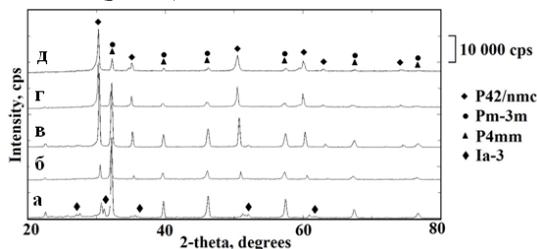


Рисунок 1 – Дифрактограммы образцов керамической системы $xY_{0,1}Zr_{0,9}O_2$ - $(1-x)(0,6SrTiO_3 - 0,4BiScO_3)$, $x=0,2$ (а); $0,3$ (б); $0,5$ (в); $0,7$ (г); $0,8$ (д)

- Идентификация температурных областей реализации размытого сегнетоэлектрического фазового перехода, высокотемпературной диэлектрической релаксации и высокотемпературной ионной проводимости экспериментальных образцов различного состава (рис. 2).

- Определение количественных характеристик размытого сегнетоэлектрического фазового перехода: температура Бёрнса, постоянная Кюри-Вейсса, степень размытия фазового перехода, степень диэлектрической релаксации.

- Получение температурной зависимости среднего времени высокотемпературной диэлектрической релаксации на основе обработки диаграмм Коул-Коула и определение энергии активации релаксационного процесса (рис. 3 и таблица 1).

- Установление особенностей в поведении высокотемпературной электропроводности (идентификация двух механизмов электропроводности и оценка их энергий активации).

- Установление закономерностей изменения высокотемпературной ионной (транспорт ионов кислорода) проводимости в зависимости от степени неоднородности и неупорядоченности образцов разрабатываемой системы, определяемой и контролируемой химическим составом. Определение энергии активации проводимости, значения проводимости, частотной зависимости проводимости, выделение вкладов в общую проводимость от проводимости межзеренных границ и объемной проводимости Рис. 4 и таблица 2).

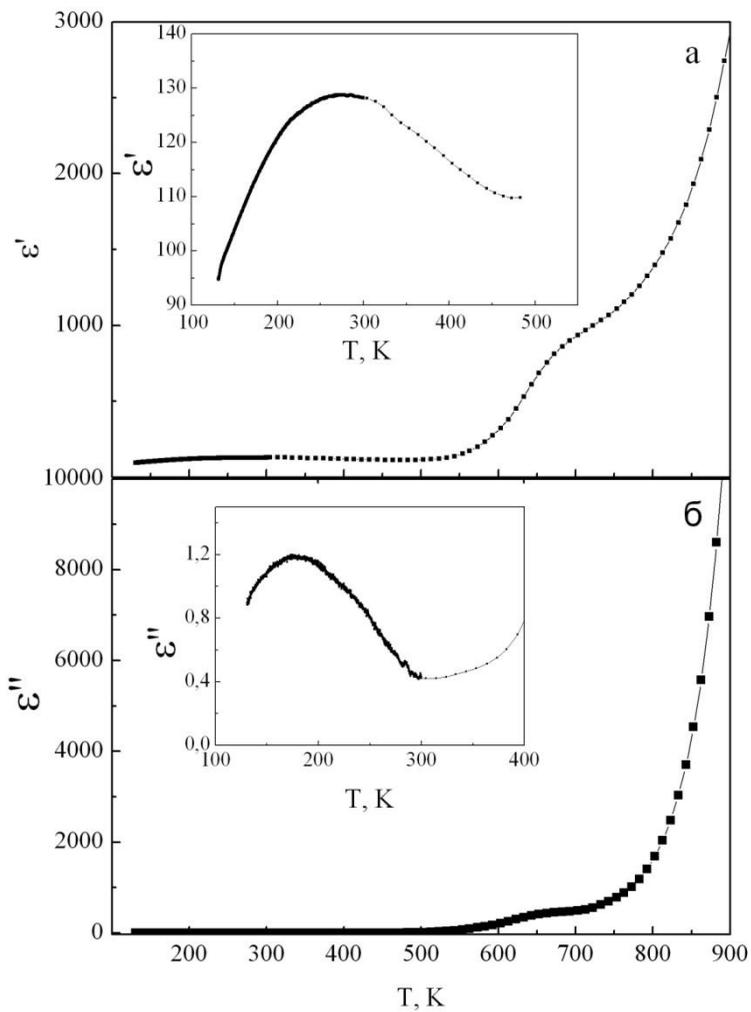


Рисунок 2 – Температурные зависимости ϵ' (а) и ϵ'' (б) образца керамического материала $0,5\text{Y}_{0,1}\text{Zr}_{0,9}\text{O}_2-0,5(0,6\text{SrTiO}_3 - 0,4\text{BiScO}_3)$

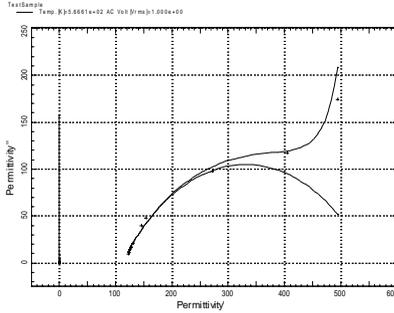


Рисунок 3 – Диаграмма Коула-Кола для состава 0,3Z-0,7STBS при температуре 560 К

Таблица 2.1. Значения энергии активации релаксационного процесса для образцов различного состава

Состав, x	U , эВ
0,2Z-0,8STBS	1,02
0,3Z-0,7STBS	1,22
0,5Z-0,5STBS	1,78
0,7Z-0,3STBS	1,41
0,8Z-0,2STBS	0,88

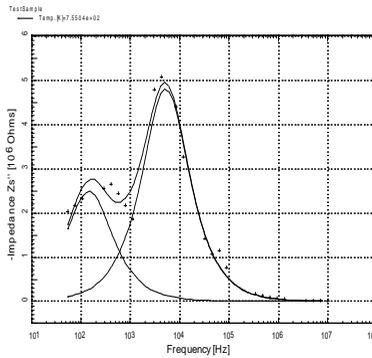


Рисунок 4 – Частотные зависимости мнимой части импеданса для образцов 0,3Z-0,7STBS

Таблица 2 – Значения энергии активации релаксационного процесса и электропроводности для образцов различного состава

состав	U, эВ	Egb, эВ	Ebulk	Ettotal
0,2Z-0,8STBS	1,02	0,59	0,41	0,89
0,3Z-0,7STBS	1,22	0,97	1,07	1,12
0,5Z-0,5STBS	1,78	1,09	1,31	1,27
0,7Z-0,3STBS	1,41	1,26	1,02	1,15
0,8Z-0,2STBS	0,88	1,27	0,95	0,99

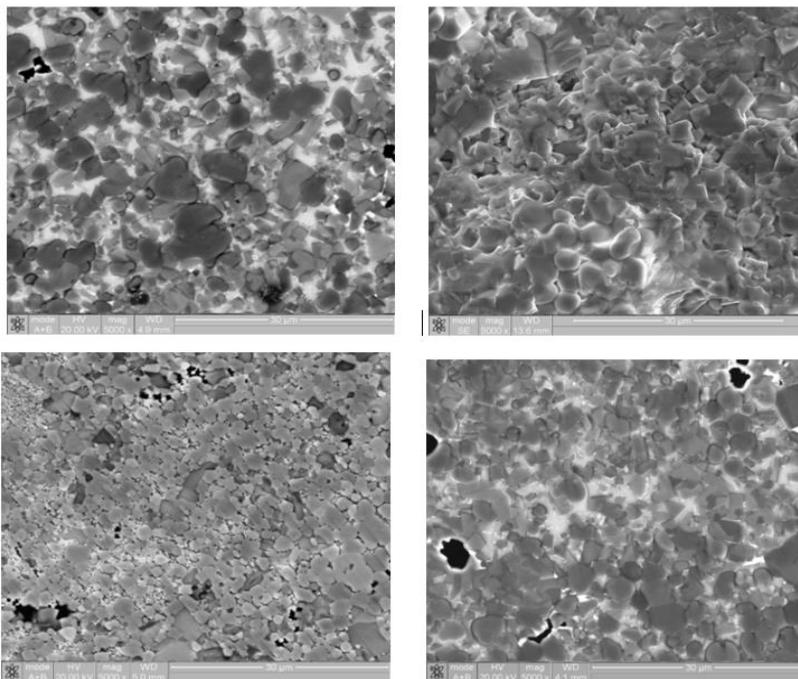


Рисунок 5 – РЭМ-изображения поверхности образцов 0,3Z-0,7STBS, 0,5Z-0,5STBS, 0,7Z-0,3STBS и 0,8Z-0,2STBS (изображения даны в порядке слева направо и сверху вниз)

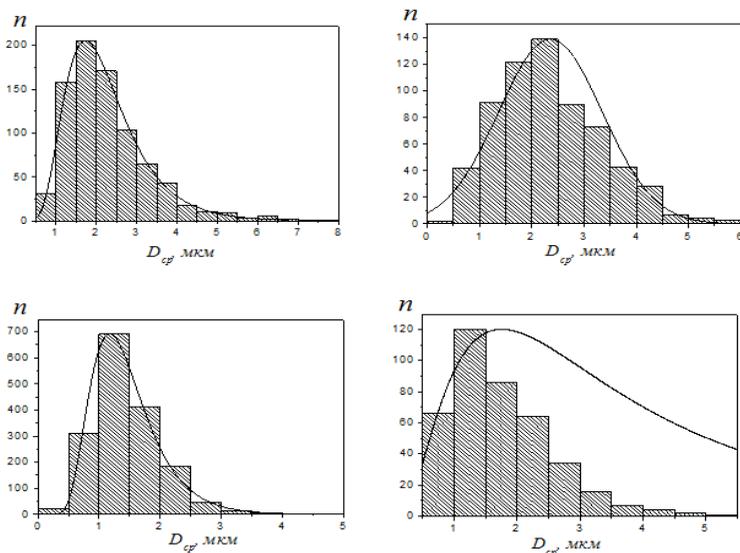


Рисунок 6 – Гистограммы распределения зерен по размерам образцов 0,3Z-0,7STBS, 0,5Z-0,5STBS, 0,7Z-0,3STBS и 0,8Z-0,2STBS

Результаты проекта предназначены для использования в науке, технике и образовании.

В науке: установленные закономерности влияния реальной структурной неупорядоченности и неоднородности на высокотемпературную ионную проводимость образцов разрабатываемой системы будут способствовать развитию и углублению физических представлений о влиянии реальной структуры на физические свойства твердых тел; разрабатываемые технологические способы получения керамических материалов многокомпонентных систем могут быть использованы при разработке новых научных и технологических подходов к получению неоднородных материалов, физические свойства которых будут в значительной мере определяться реальной структурой материалов, целенаправленно «задаваемой» в процессе их получения.

В технике: разрабатываемая керамическая система может быть использована при создании твердооксидных топливных элементов.

В образовании: результаты проекта могут быть использованы при подготовке специалистов, бакалавров и магистров по специальностям

«физика конденсированного состояния», «материаловедение и технологии материалов», «наноматериалы» и т.д. (разработка лекционных курсов, постановка лабораторных работ, подготовка курсовых и дипломных работ); при подготовке диссертационных работ кандидатов и докторов наук; при проведении научных стажировок для молодых преподавателей и ученых вузов РФ, организации курсов повышения квалификации.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08032 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Garsia-Barriocanal, J. Colossal ionic conductivity at interfaces of epitaxial $ZrO_2:Y_2O_3/SrTiO_3$ heterostructures [Text] / J. Garsia-Barriocanal, A. Rivera-Calzada, M. Varela, Z. Sefrioui, M. R. Daz-Guilln, K.J. Moreno, J.A. Daz-Guilln, E. Iborra, A.F. Fuentes, S.J. Pennycook, C.J. Santamaria // Chem. Phys. Chem. 2009. Vol. 10. P.676 680.
2. Pennycook, Timothy J. Seeing oxygen disorder in YSZ/SrTiO₃ colossal ionic conductor heterostructures using EELS [Text] / Pennycook T., Oxley M.P. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2011. Vol. 54. P. 3507 - 33511.
3. Garsia-Barriocanal, J. Tailoring Disorder and Dimensionality: Strategies for Improved Solid Oxide Fuel Cell Electrolytes [Text]/ Garsia-Barriocanal J., Rivera-Calzada A., Varela M., Sefrioui Z., R. Daz-Guilln M., Moreno K.J., Daz-Guilln J.A., Iborra E., Fuentes A.F., Pennycook S.J., Santamaria C.J. //Chem. Phys. Chem. 2009. Vol. 10. P.1003 1011.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЭКОМОНИТОРИНГА И
УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ
ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ АГЛОМЕРАЦИЙ**

olga.ivashuk@mail.ru

**Ивашук О.А., д-р техн. наук, доц.,
Константинов И.С., д-р техн. наук, проф.,
Ивашук О.Д., канд. техн. наук,
Федоров В.И. аспирант**
*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

Аннотация. В статье рассмотрены основные результаты полученные в ходе выполнения проекта РФФИ № 14-41-08055 «Исследование и разработка распределенной автоматизированной системы интеллектуального экомониторинга и управления экологической безопасностью городских территориальных агломераций», а именно представлены функциональная и структурная модель системы, модель экологической безопасности, как объекта управления, методы комплексной оценки и прогнозирования экологической ситуации городских агломераций. Представлена реализация системы для конкретных территорий.

Ключевые слова: биотехносфера городских территориальных агломераций, интеллектуальный анализ данных, ситуационное моделирование, экологическая ситуация, интегральная оценка.

Важнейшей составляющей национальной безопасности любого современного государства является экологическая безопасность его территорий различного назначения. Следует особо выделить городские агломерации, качественное состояние природной среды которых оказывает значительное воздействие на здоровье и жизнедеятельность людей. Сегодня нет стран, в которых бы не уделялось должного внимания проблемам экологии. Одним из основных направлений снижения и предотвращения возникновения и развития техногенных и природных экологических рисков – активной мерой – является создание эффективных систем мониторинга, прогнозирования и управления

экологической безопасностью. Следует отметить, что и в России, и за рубежом, даже в регионах, где функционируют системы автоматизированного экологического мониторинга с развитой сетью стационарных и мобильных станций, обеспеченные современными датчиками и приборами слежения, использующие геоинформационные и аэрокосмические технологии, современные расчетные методики, не наблюдается принципиального улучшения экологической ситуации. Это во многом связано с тем, что подобные системы, эффективно реализуя сбор и первичную обработку данных, позволяют осуществлять адекватную оценку текущего состояния природной среды, мощность негативного техногенного воздействия, выявлять источники загрязнения, однако, наделены очень слабыми функциями поддержки принятия управленческих решений. При этом не осуществляется процесс прогнозирования динамики биотехносферы, ситуационное моделирование, формирование и оценка результативности возможных сценариев управления, без чего крайне затруднительно трансформировать полученную экоинформацию в оперативные рациональные управленческие решения по предотвращению и значительному снижению экотехногенных рисков, ее использование в стратегическом планировании преобразования биосферы и развития региональных техногенных систем на основе биосферосовместимости. Задача усложняется многогранностью и высокой динамикой взаимодействия природных и техногенных объектов, значительной пространственной распределенностью элементов объектов мониторинга и субъектов управления.

Целью научных исследований являлось создание научно-методологических основ построения и сопровождения систем, обеспечивающих поддержку и реализацию объективных, высоко результативных управленческих решений по предотвращению и снижению (ликвидации) негативного техногенного воздействия на биосферу территорий различного уровня, как следствие – повышение качества жизни населения регионов России.

Проведенный комплексный анализ существующих подходов к поддержке принятия решений в сфере управления экологической безопасностью городских агломераций показал, что сегодня для получения и обработки информации, необходимой для выработки управляющих решений, только в некоторых крупных городах используются современные автоматизированные системы экомониторинга и прогнозирования. В остальных регионах проводится выборочный контроль отдельных компонентов окружающей среды на

базе специализированных лабораторий. Выявлены основные недостатки существующих систем, определяющие снижение их результативности как основы информационного обеспечения процесса управления:

- слабая связь с задачами поддержки принятия управленческих решений;
- отсутствие комплексной оценки экологической ситуации по совокупному состоянию различных компонентов биотехносферы,
- отсутствие оценки и прогнозирования экологической ситуации, сложившейся на рассматриваемой территории.

Были определены требования к функциональности разрабатываемой системы, решающей задачи мониторинга, прогнозирования и управления, и построена ее функциональная модель (рисунок 1). На данном рисунке I_0 – информация о параметрах состояния экологической безопасности; I_{01} – обработанная информация; I_1 ($I_1 = \{I_{11}, I_{12}\}$) – результаты первичных оценок (I_{11}) и прогнозов (I_{12}); I_2 – результаты прогнозирования, оценки сценариев управления; I_3 ($I_3 = \{I_{31}, I_{32}\}$) – модели; I_c – выбранные для реализации сценарии управления.

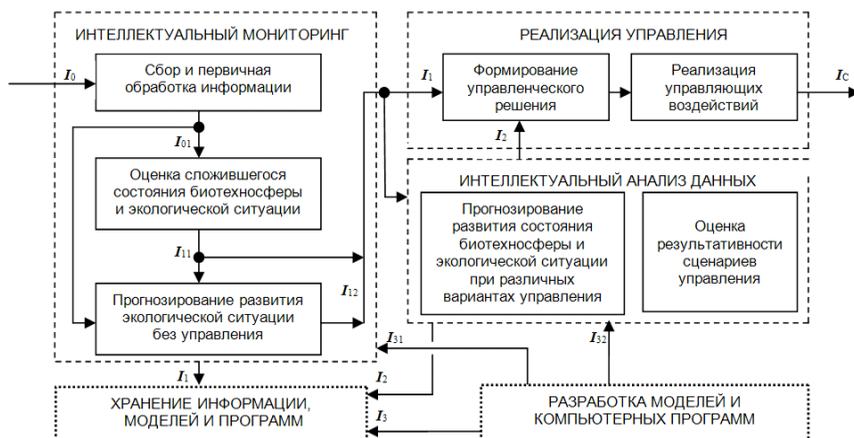


Рисунок 1 – Функциональная модель распределенной автоматизированной системы интеллектуального экологического мониторинга и управления экологической безопасностью городских территориальных агломераций

На основе проведенного анализа и выявленных функций построена структурная модель системы, показанная на рисунке 2.

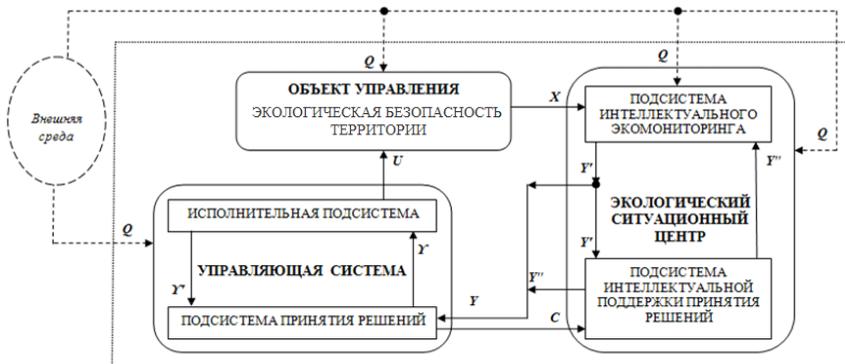


Рисунок 2 – Структурная модель распределенного мониторинга и управления экологической безопасностью городских территориальных агломераций

Определены следующие основные подсистемы: объект управления; управляющая система, формирующая управленческие решения Y и реализующая управляющие воздействия U ; экологический ситуационный центр (ЭСЦ), который объединяет интеллектуальные подсистемы мониторинга и поддержки принятия решений; X – параметры состояния объекта управления; Y – множество входных параметров управляющей системы, обеспечивающие поддержку принятия решений (Y' – обработанные данные интеллектуального мониторинга, Y'' – результаты интеллектуального анализа данных, Y''' – модели); Y' – выбранные управляющие воздействия, изменения в параметрах территории и т.п.; C – параметры обратной связи в системе; Q – параметры влияния внешней среды.

Выбор параметров интеллектуального мониторинга, интеллектуального анализа данных, определение множества управляющих воздействий зависит от особенностей объекта управления. Построена и исследована его теоретико-множественная модель; проанализированы связи с внешней средой и достигнута замкнутость системы; выявлены основные компоненты и рассмотрены механизмы их взаимодействия между собой. В результате, экологическая безопасность городских агломераций представлена многокомпонентной системой (рисунок 3), состояние которой в каждый момент времени характеризуется определенной совокупностью параметров состояния природной ($X_{пс}$), техногенной ($X_{тс}$) и

социальной подсистем (X_{CC}), параметров их взаимодействия X'_{PC} , X'_{TC} , X'_{CC} при условии влияния внешней среды Q_{BT} .



Рисунок 3 – Модель объекта управления

Реализация управления экологической безопасностью как сложной природно-социо-техногенной системой – состояние которой характеризуется как количественными, так и качественными параметрами, множественными и неоднородными исходными данными, для которой неправомерно постановка классической задачи оптимизации – должна основываться на технологиях искусственного интеллекта, ситуационном подходе и ситуационном моделировании.

Традиционно оценка экологической ситуации осуществляется на основании оценки негативных последствий для природных ландшафтов и здоровья населения. В данной работе предлагается другой подход: комплексная оценка, как с точки зрения возможности возникновения экологически опасных зон, так и необходимости реализации управленческих решений различного уровня.

Также следует учитывать, что одно и то же управляющее воздействие может вызвать изменение как выбранного для изменения параметра, так и другого параметра состояния данной подсистемы или любого из параметров другой подсистемы объекта управления, которые не рассматривались для вариации. Таким образом, необходима комплексная оценка: с точки зрения сохранения всех параметров качества исследуемых подсистем объекта управления в требуемых пределах.

Для описания экологической ситуации введена лингвистическая переменная:

$$\{EcSit, T, ES, G, H\},$$

где T – базовое терм-множество; ES – набор количественных характеристик; G – множество синтаксических правил для образования новых значений $EcSit$; H – математические правила.

Минимальная точность оценки $T = \{T_1, T'\}$: $T_1 =$ «благоприятная», $T' =$ «неблагоприятная»; $T' = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$, где $T_2 =$ «относительно напряженная», $T_3 =$ «напряженная», $T_4 =$ «конфликтная», $T_5 =$ «кризисная».

Проведенный выше анализ объекта управления показывает, что рассматриваемая лингвистическая переменная должна быть составной: где $EcSit_{ПС}$ характеризует состояние природной подсистемы; $EcSit_{ТС}$ – техногенной подсистемы. Аналогично $EcSit$ введем лингвистические переменные $EcSit_{ПС}$, $EcSit_{ТС}$. Минимальная точность оценки состояния природной и технической подсистем $T_{ПС1} = T_{ТС1} =$ «удовлетворительное», $T'_{ПС} = T'_{ТС} =$ «неудовлетворительное».

Для задания введенных зависимостей строятся соответствующие наборы условных правил логического вывода, например, для $EcSit$:

$$\begin{aligned} & \text{если } (EcSit_{ПС} \text{ есть } T_{ПС1}) \text{ и } (EcSit_{ТС} \text{ есть } T_{ТС1}) \\ & \text{или } (EcSit_{ПС} \text{ есть } T_{ПСn}) \text{ и } (EcSit_{ТС} \text{ есть } T_{ТСm}) \\ & \dots \\ & \text{то } EcSit \text{ есть } T_l, \end{aligned}$$

где $T_{ПСn}$ ($n = \overline{1, N}$) и $T_{ТСm}$ ($m = \overline{1, M}$) – нечеткие термы, которыми оцениваются $EcSit_{ПС}$ и $EcSit_{ТС}$ соответственно,

$T_{ПСn} \in T_{ПС}$, $T_{ТСm} \in T_{ТС}$; $EcSit = T_l$ ($l = \overline{1, L}$) – значения, полученные на основе правил нечеткого логического вывода, представляющие собой оценку экологической ситуации по интегральному показателю, определяемому при синтезе знаний о состоянии подсистем, характеризующих состояние биотехносферы рассматриваемой территории.

На рисунке 4 представлен алгоритм реализации комплексной оценки как текущей, так и прогнозной экологической ситуации на рассматриваемой территории (по данным инструментального и компьютерного мониторинга), разработанный согласно изложенной выше технологии.

Предварительная комплексная оценка экологической ситуации формируется уже на уровне функционирования подсистемы

интеллектуального мониторинга; далее необходим ее детальный анализ для выработки рациональных управляющих решений.

В результате выработки управляющих воздействий формируется сценарий управления биотехносферой, обеспечивающий динамику экологическую ситуации на рассматриваемой территории до состояния «благоприятная». На рисунке 5 показан алгоритм, разработанный в соответствии с вышеизложенными требованиями.

В рамках выполнения проекта были построены ситуационные модели на основе предложенных методов, с использованием аппарата нечеткой логики и ГИС-средств.

Для разработки программной реализации построенных моделей и обеспечения проведения оценок, прогнозов и формирования сценариев управления был использован язык программирования C#, с применением для построения нечетких моделей библиотеки FuzzyNet. Создан удобный интерфейс в среде Visual Studio Express, который позволяет специалисту – эксперту предметной области, не владеющему навыками моделирования и программирования, оперативно проводить имитационные эксперименты.



Рисунок 4 – Алгоритм комплексной оценки экологической ситуации



Рисунок 5 – Алгоритм формирования сценариев управления биотехносферой локальных урбанизированных территорий, обеспечивающих регуляризацию экологической ситуации

На рисунке 6 показан результат работы модели: а) оценка текущей экологической ситуации на территории г. Белгорода, где осуществляется строительство жилого дома, по совокупному состоянию природной среды (уровень загрязнения атмосферы, уровень негативного шумового воздействия, инфразвука, воздействия магнитных полей) и планировочной структуры территории с точки зрения экологической безопасности (уровень озеленения территории, уровень инсоляции, параметры транспортно-дорожного воздействия), б) оценка состояния после реализации управляющих воздействий, связанных с озеленением территории и изменении параметров транспортно-дорожного воздействия, в) оценка распределения образования отходов на территории Белгородской области.

Адрес:

Факторы отражающие качественное состояние природной среды

Коэффициент уровня загрязнения атмосферы: доли ПДК

Эквивалентный уровень шума: дБА

Общий уровень звукового давления (инеразук): дБ лн.

Интенсивность магнитного поля: мкТл А/м

Оценка состояния природной среды (промежуточная оценка):

Показатели состояния планировочной структуры с точки зрения экологической безопасности

Уровень озеленения: шт./га

Продолжительность инсоляции: мин.

Условия парковки автотранспорта: м

Оценка состояния планировочной структуры (промежуточная оценка):

Оценка экологической ситуации:

а)

Адрес:

Факторы отражающие качественное состояние природной среды

Коэффициент уровня загрязнения атмосферы: доли ПДК

Эквивалентный уровень шума: дБА

Общий уровень звукового давления (инеразук): дБ лн.

Интенсивность магнитного поля: мкТл А/м

Оценка состояния природной среды (промежуточная оценка):

Показатели состояния планировочной структуры с точки зрения экологической безопасности

Уровень озеленения: шт./га

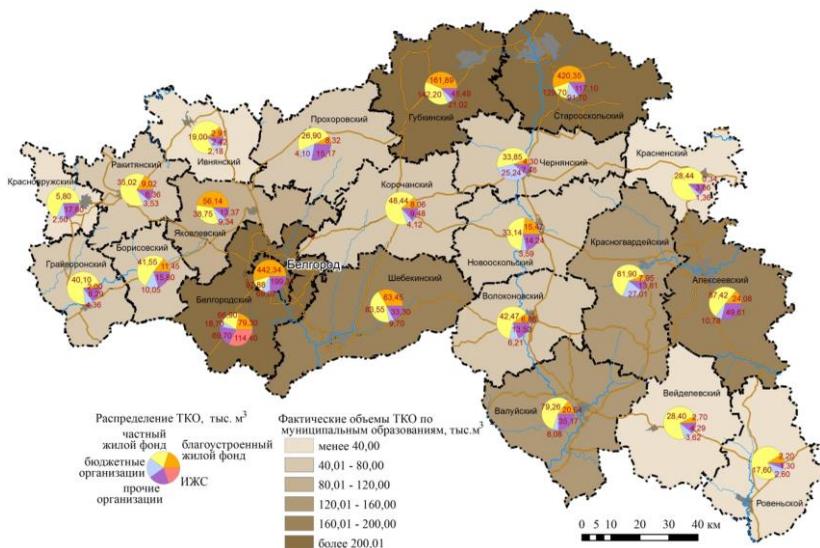
Продолжительность инсоляции: мин.

Условия парковки автотранспорта: м

Оценка состояния планировочной структуры (промежуточная оценка):

Оценка экологической ситуации:

б)



В)

Рисунок 6. – Результат работы модели по формированию и оценке управляющих воздействий

Разработанные методы, модели, алгоритмы и их программная реализация определили возможность разработки предварительных проектных решений и прототипа распределенной автоматизированной системы интеллектуального экомониторинга и управления экологической безопасностью городских территориальных агломераций.

Для примера функционирования прототипа были исследованы территории 241 двора (г. Белгород, г. Орел), для которых проведена комплексная оценка экологической ситуации на базе натуральных и компьютерных экспериментов по оценке отдельных компонентов биотехносферы и разработаны соответствующие рекомендации, продемонстрированные с помощью рисунка 7.

Проведена оценка экологического ущерба, нанесенного атмосфере от нарушения условий размещения автотранспорта на 30-ти различных дворовых территориях г. Белгорода, который составил около 50 млн. руб. в год. Предполагаемый экономический результат от реализации управляющих воздействий по снижению воздействия автотранспорта за

счет зонирования территорий и повышения коэффициента озеленения составляет более 30 млн. в год в ценах 2016 года.

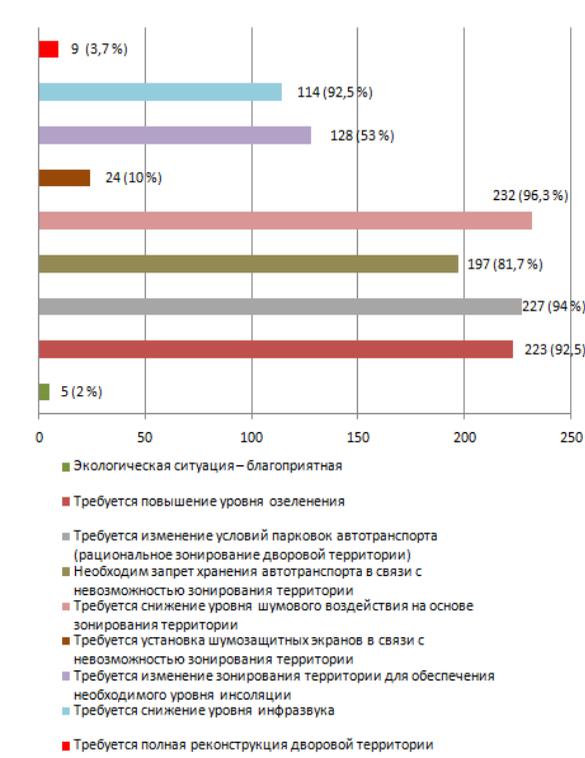


Рисунок 7 – Рекомендации по результатам комплексной оценки

Анализ результатов полученных при выполнении проекта позволяет утверждать, что задачи решены в полном объеме и в соответствии с предъявленными требованиями, включая обеспечение достоверности выводов.

Полученные при выполнении научно-исследовательской работы результаты могут быть эффективно использованы при осуществлении интеллектуального мониторинга городских территориальных агломераций, обеспечения интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении экологической безопасностью данных территорий на основе комплексных модельных оценок и

прогнозирования динамики состояния техносферной безопасности, оперативного формирования и оценки результативны сценариев управления. Кроме того, результаты исследования в виде моделей и их программной реализации целесообразно использовать при проектировании и строительстве новых промышленных и жилых объектов для оперативной, объективной оценки сложившейся и прогнозной экологической ситуации, разработки научно обоснованных сценариев управления экологической безопасностью территорий.

Применение полученных результатов снизит затраты на дорогостоящее оборудование, позволит значительно сократить негативное техногенное воздействие на окружающую среду.

Предлагаемая технология и прототип системы принципиально отличаются: возможностью интеллектуального анализа данных уже на уровне подсистемы мониторинга; включением не имеющей аналогов интеллектуальной подсистемы поддержки принятия решений, наделенной функциями кратко-, средне- и долгосрочного прогнозирования динамики экологической безопасности, формирования ситуационных и математических моделей с определением требуемых параметров состояния экологической безопасности, формирования альтернативных сценариев управления с оценкой их результативности.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08055 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Ivashuk O.A. Situational modeling for the control of technospheric safety/ Ivashuk O.A., Lazarev S.A., Ivashchuk O.D., Fedorov V.I. // JOURNAL OF CURRENT RESEARCH IN SCIENCE: 4 (1), 2016: 84-90
2. Константинов И.С., Польщиков К.А., Ивашук О.Д. К вопросу обеспечения связи в процессе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах строительства/ Константинов И.С., // Строительство и реконструкция 2016. № 64
3. Olga A. Ivashuk Electronic Model of Waste Treatment Scheme/ Olga A. Ivashuk etc. // Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016. Volume 11. Pp. 688-690.
4. Gennadiy V. Averin. Data Intellectual Analysis Means Use for Condition Indicators Assessment of the Territorial and State Formations/Gennadiy V. Averin, Anna V. Zviagintseva, Igor S. Konstantinov and Olga A. Ivashchuk/Research Journal of Applied Sciences, 2015, Volume: 10, Issue: 8, Page No.: 411-414

5. Иващук, О.А. Ситуационное моделирование в автоматизированных системах мониторинга и управления экологической безопасностью. [Текст]/ О.А. Иващук, О.Д. Иващук, Д.А. Кванин, В.И. Федоров // Информационные системы и технологии, 2015. – № 2 (88) март-апрель. – С. 57-64.
6. Иващук О.А., Константинов И.С., Иващук О.Д. Моделирование в системах экомониторинга, прогнозирования и управления экологической ситуацией на территориях жилой застройки: монография [Текст]/ Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2015. 104 с.
7. Иващук О.А., Иващук О.Д., Федоров В.И., Кванин Д.А. Ситуационное моделирование при управлении биотехносферой территорий городских агломераций // Информационные системы и технологии, 2015. № 2 (88) март-апрель. С. 57-64.
8. Иващук О.А., Константинов И.С., Иващук О.Д. Моделирование в системах экомониторинга, прогнозирования и управления экологической ситуацией на территориях жилой застройки: монография [Текст]/ Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2015. 104 с.
9. Olga A. Ivaschuk, Modern Information Technologies in Environmental Sciences: Climate Wikiencie. / Ramon Antonio Rodrigues Zalipynis, Olga A. Ivaschuk, Igor S. Konstantinov // Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), September 24-26, 2015, Warsaw, Poland, Volume 2, Special Stream in Advanced IT in Environmental Sciences. – P. 593-598.
10. Иващук О.А., Константинов И.С. Концептуальные подходы к построению автоматизированной системы управления экологической ситуацией в горно-металлургических кластерах // Горный журнал. 2015. № 8. С. 99-102

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТОВ

alexxy@mail.ru

Коновалов В.М., канд. техн. наук, доц.,

Новоселов А.Г., канд. техн. наук, доц.,

Мандрикова О.С., канд. техн. наук, доц.

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

Аннотация. Показана возможность использования при получении цемента в качестве железосодержащей корректирующей добавки техногенного отхода феррованадиевого производства. Комплексом физико-химических методов установлено интенсифицирующее влияние добавки отхода на процессы клинкерообразования. Микроскопические исследования синтезированных клинкеров показали, что клинкер, полученный с отходом, характеризуется более крупной кристаллизацией основных клинкерных минералов. Установлено повышение прочности цементов до 25%, полученных из клинкеров с отходом, в ранние сроки твердения по сравнению с рядовым. Наличие примесных оксидов в составе отхода приводит к незначительному снижению фактического коэффициента насыщения и прочности цемента в 28 суточном возрасте.

Ключевые слова: Техногенные отходы, клинкер, микроструктура клинкера, корректирующая добавка.

Накопление и утилизация отходов является серьезной экологической проблемой, так как отходы от работы заводов и перерабатывающих предприятий накапливаются в огромных количествах, негативно влияя на окружающую среду. Возможность применения техногенных материалов при производстве цемента изучают во всем мире [1-4]. Использование техногенных отходов в качестве сырья в цементной промышленности позволяет решить не только проблему утилизации отходов, но и проблему рационального использования природных ресурсов. Одним из таких отходов является железистый отход феррованадиевого производства, химический состав которого представлен в таблице 1.

Расчет сырьевых смесей для получения цемента, которые состояли из мела, глины, боксита и корректирующей добавки, производился по

стандартным коэффициенту насыщения и силикатному и глиноземному модулям.

Были проведены сравнительные испытания клинкеров, приготовленных на основе рядовой сырьевой смеси (смеси с пиритными огарками) с КН=0,91 – смесь №1, смеси, содержащей в качестве железистого компонента ферритный отход, с КН=0,91 – смесь №2, и смеси, содержащей в качестве железистого компонента ферритный отход, с КН=0,93 – смесь №3.

Таблица 1 – Химический состав отхода феррованадиевого производства, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	V ₂ O ₅	ППП
14,1	3,35	39,8	10,5	1,52	14,2	2,86	6,34	4,43	2,69	6,30

Сырьевая смесь, содержащая ферритный отход в качестве корректирующей добавки, с КН=0,93 исследовалась, исходя из предположения, что в результате повышенного содержания примесей в ферритном отходе клинкер, содержащий данный отход, может иметь пониженную прочность по сравнению с рядовым клинкером с таким же КН, т.к. оксид хрома, содержащийся в отходе, может препятствовать образованию алита и тем самым снижать активность клинкера.

Химические составы исследуемых смесей и клинкеров приведены в таблице 2. Минералогические составы и модульные характеристики клинкеров представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Химический состав сырьевых смесей и клинкеров, %

Смесь/клинкер	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	ППП	Проч ее
Смесь 1 (КН=0,91)	14,18	3,66	2,80	43,11	0,52	0,12	0,63	34,79	0,20
Смесь 2 (КН=0,91)	13,98	3,59	2,76	42,94	0,55	0,59	0,59	34,33	0,66
Смесь 3 (КН=0,93)	13,79	3,54	2,73	42,12	0,55	0,58	0,58	34,45	0,65
Клинкер 1 (КН=0,91)	21,74	5,59	4,30	66,12	0,79	0,19	0,96	–	0,30
Клинкер 2 (КН=0,91)	21,29	5,47	4,21	65,38	0,84	0,90	0,90	–	1,01
Клинкер 3 (КН=0,93)	21,04	5,41	4,16	65,79	0,83	0,89	0,89	–	1,00

Сырьевые смеси и клинкеры для получения рядового цемента и цемента, содержащего отход, с одинаковым КН имели схожий химический состав по основным оксидам.

Основной отличительной особенностью клинкеров, приготовленных с использованием техногенных материалов, было повышенное содержание в них оксида серы, вносимой в сырьевую смесь ферритным отходом (табл. 2). Содержание SO_3 в клинкерах с отходом превышало содержание SO_3 в рядовом клинкере на 80%. Кроме того, в клинкерах, приготовленных с использованием техногенных материалов, – клинкере 2 и клинкере 3 – содержание примесей превышало в 3 раза содержание примесей в рядовом клинкере.

Таблица 3 – Минералогический состав (в %) и модульные характеристики клинкеров

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	КН	n	p
Клинкер 1	60,35	16,90	7,54	13,09	0,91	2,2	1,3
Клинкер 2	59,02	16,53	7,38	12,81	0,91	2,2	1,3
Клинкер 3	63,12	12,71	7,29	12,65	0,93	2,2	1,3

Сырьевые смеси обжигались в силитовой печи при температуре $1450^{\circ}C$ с 40-минутной изотермической выдержкой.

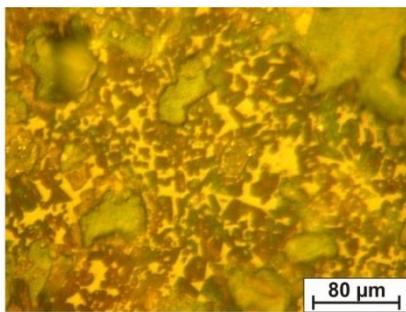


Рисунок 1 – Микроструктура рядового портландцементного клинкера №1 с КН=0,91

При проведении рентгенофазового анализа установлено, все клинкеры представлены основными клинкерными минералами. Образование новых фаз под влиянием отхода не зафиксировано. Все опытные клинкеры характеризуются полным связыванием оксида кальция.

Микроскопические исследования синтезированных клинкеров показали, что полученные клинкеры отличаются друг от друга, главным образом, размерами кристаллов минералов клинкера, что обусловлено различием

в составах корректирующих компонентов, используемых при получении цемента.

Рядовой клинкер №1 имел пористую структуру и малую прочность. Кристаллизация минералов четкая, структура клинкера неравномерно-зернистая (рис. 1).

Алит в данном клинкере представлен кристаллами гексагональной формы: шестиугольной, вытянутой, прямоугольной, встречались кристаллы неправильной формы. Кристаллы часто пористые, содержали включения белита и промежуточного вещества. Также встречались скопления кристаллов, особенно вокруг пор, иногда встречались сростки кристаллов. Размер зерен алита – 5...40 мкм, преобладающий размер зерен алита – 18 мкм.

Белит представлен кристаллами в основном округлой и овальной форм с четкими краями. Чаще всего встречался в виде больших групп и скоплений, особенно вокруг пор. Размер зерен белита – 5...45 мкм, преобладающий размер зерен белита – 25 мкм. Промежуточного вещества достаточно.

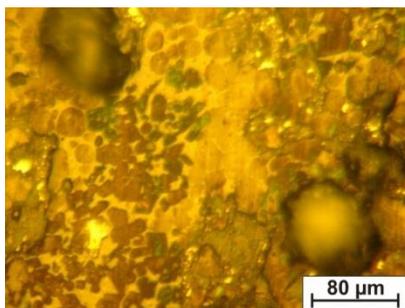


Рисунок 2 – Микроструктура порландцементного клинкера №2 на основе ферритного отхода с $KH=0,91$

Клинкер №2 также имел пористую структуру, но, в отличие от рядового клинкера, высокую прочность. Кристаллизация минералов четкая, структура клинкера неравномерно-зернистая (рис. 2).

Алит в клинкере, содержащем ферритный отход, представлен кристаллами шестиугольной, вытянутой, прямоугольной форм, иногда встречались кристаллы неправильной формы. Кристаллы

плотные, редко встречались пористые кристаллы, содержащие включения белита и промежуточного вещества. Также имели место скопления кристаллов, особенно вокруг пор, иногда встречались сростки кристаллов. Размер зерен алита – 10...50 мкм, преобладающий размер зерен алита – 25 мкм.

Белит в клинкере представлен кристаллами округлой и овальной форм с четкими краями. В основном встречался в виде больших групп и скоплений, особенно вокруг пор. Размер зерен белита – 5...40 мкм, преобладающий размер зерен белита – 25 мкм.

Клинкер №3 имел пористую структуру и высокую прочность. Кристаллизация минералов четкая, структура клинкера неравномерно-зернистая (рис. 3).

Алит в клинкере представлен кристаллами шестиугольной, вытянутой, прямоугольной форм, иногда встречались кристаллы неправильной формы. Кристаллы плотные, встречались пористые кристаллы, содержащие включения белита и промежуточного вещества. Имели место скопления кристаллов, особенно вокруг пор, иногда встречались сростки кристаллов. Размер зерен алита – 7...40 мкм, преобладающий размер зерен алита – 20 мкм.

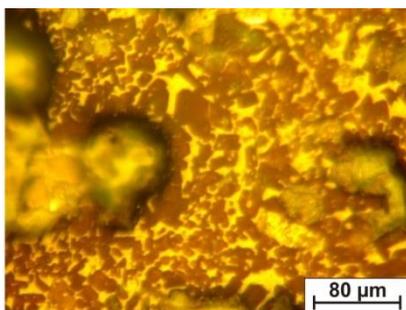


Рисунок 3 – Микроструктура порландцементного клинкера №3 на основе ферритного отхода с $KH=0,93$

Белит представлен кристаллами округлой и овальной форм с четкими краями. В основном кристаллы белита встречались в виде больших групп и скоплений, особенно вокруг пор. Размер зерен белита – 8...40 мкм, преобладающий размер зерен белита – 30 мкм.

Таким образом, микроскопические исследования показали, что кристаллическая структура клинкеров различна: в клинкерах №1 и №3 алит представлен сравнительно небольшими кристаллами, тогда как в клинкере №2 наряду с мелкокристаллическим алитом присутствует крупнокристаллический.

Подобную кристаллизацию клинкера №2, вероятно, можно объяснить наличием в его составе повышенного содержания примесных элементов - $CaSO_4$, TiO_2 , Cr_2O_3 , MnO_2 , источником которых является ферритный отход.

В присутствии серы, образующей при низких температурах различные сульфаты ($CaSO_4$, Na_2SO_4 , K_2SO_4 , CaS , FeS), которые являются при небольшом их содержании катализаторами, ускоряется процесс минералообразования: понижается температура диссоциации $CaCO_3$, ускоряется процесс разложения сульфата кальция, и снижается температура образования C_2S .

Помимо этого крупнокристаллическая структура алита связана со свойствами клинкерного расплава в присутствии серы. Так, при наличии в клинкере небольшого количества сульфата эвтектический

расплав появляется при пониженной температуре, и его свойства под влиянием SO_4^{2-} улучшаются: понижается вязкость и поверхностное натяжение, увеличивается скорость диффузии ионов, в соответствии с чем интенсифицируются процессы растворения C_2S и CaO в расплаве и кристаллизации из последнего. Примесные элементы также оказывают каталитическое воздействие на клинкерообразование.

Несмотря на то, что клинкер №3 приготовлен из тех же сырьевых материалов, что и клинкер №2, и имеет близкое по значению содержание $CaSO_4$, алит представлен в нем сравнительно мелкими кристаллами. Данное явление объясняется тем, что клинкер №3 имеет более высокий коэффициент насыщения, а с ростом КН затрудняется обжиг и усвоение CaO кислотными оксидами, следовательно, при одинаковых температуре обжига и изотермической выдержке рекристаллизация в клинкере №3 произойти не успевает. Повышение коэффициента насыщения для опытного клинкера определяет изменение структуры кристаллизующихся фаз с увеличением доли мелкокристаллического алита.

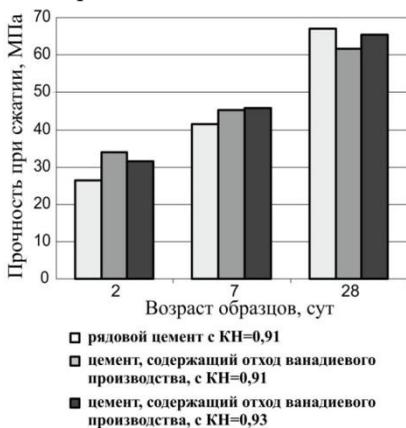


Рисунок 4 – Гидравлическая активность синтезированных клинкеров

Прочностные характеристики цементов определялись в малых образцах с размером ребра 1,41 см в 2-, 7- и 28-суточном возрастах. В 2- и 7-суточном возрастах цемент на основе отхода характеризовался повышенной прочностью при сжатии в сравнении с рядовым цементом на 25 и 11% соответственно. Но к 28 суткам твердения наблюдается некоторое снижение прочности на сжатие на 3 и 9% в сравнении с рядовым (рис. 4).

Некоторое снижение прочности цементов, содержащих клинкеры с отходом, в сравнении с рядовым цементом связано, как и предполагалось, с негативным влиянием хроматов, содержащихся в отходе, которые снижают скорость связывания оксидов с образованием клинкерных минералов и, тем самым, препятствуют образованию алита, отвечающему, главным образом, за прочностные показатели в 28-суточном возрасте. Кроме

того, оксид хрома, оксид титана, оксид марганца, содержащиеся в отходе, могут вступать во взаимодействие с оксидом кальция, связывая его в хроматы, титанаты, манганаты кальция, что приводит к недостатку СаО, необходимого для образования алита.

Сравнение расчетного и фактического фазовых составов синтезируемых клинкеров, определенного микроскопическим методом показало, что клинкеры, полученные с использованием отхода, действительно имеют пониженный коэффициент насыщения по сравнению с расчетным и содержат меньшее количество алита и большее – белита (табл. 4).

Клинкер, приготовленный с использованием отхода, с КН=0,91 фактически содержал на 4% алита меньше по сравнению с расчетным значением, а клинкер, приготовленный с использованием отхода, с КН=0,93 – на 3%.

Таблица 4 – Сравнение расчетного и фактического составов синтезированных клинкеров

Фазовый состав	Рядовой клинкер с КН=0,91			Клинкер, содержащий отход, с КН=0,91			Клинкер, содержащий отход, с КН=0,93		
	C ₃ S	C ₂ S	КН	C ₃ S	C ₂ S	КН	C ₃ S	C ₂ S	КН
Расчетный	60,3	16,9	0,91	59	16,5	0,91	63,1	12,7	0,93
Фактический	59	18	0,90	55	22	0,88	60	15	0,92

Возможно, снижение доли алита, по сравнению с расчетным количеством, является причиной снижения активности цемента в 28 суточном возрасте.

Выводы

1. Отход феррованадиевого производства, используемый в качестве корректирующей железосодержащей добавки цементной сырьевой смеси, повышает гидравлическую активность цемента в ранние сроки твердения на 25 и 11% в 2 и 7 суточном возрасте соответственно.

2. Наличие в техногенном отходе сульфата и примесей, которые меняют свойства клинкерного расплава, приводит к тому, что клинкер, содержащий ферритный отход, имеет более крупную кристаллизацию минералов по сравнению с рядовым клинкером.

3. Наличие примесных оксидов в составе отхода феррованадиевого производства незначительно снижают 28 суточную прочность цемента (на 3 – 9%), что позволяет рассматривать данный отход как

эффективную добавку при замене дефицитного железистого компонента в производстве цемента.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08031 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Классен В.К., Борисов И.Н., Мануйлов В.Е. Техногенные материалы в производстве цемента. Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 125 с.
2. Борисов И.Н. Особенности процессов минералообразования при обжиге цементного клинкера с использованием медеплавильного шлака // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. №2. С. 11-13.
3. Борисов И.Н., Мандрикова О.С. Железосодержащий отход химического производства – корректирующая добавка цементной сырьевой смеси // Инновационные материалы и технологии (XX науч. чт.): сб. докл. Межд. науч.-практ. конф., Белгород, 11–12 окт. 2011 г. Белгород: Изд-во БГТУ. 2011. Ч. 3. С. 3-6.
4. Roppelt T. Use of alternative raw materials for cement clinker production // Cement International. 2006. №1. С. 54-63.

СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛОЖЕНИЙ ГЕОНИКИ

alex-0904@mail.ru

**Лесовик В.С., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
Володченко А.А., канд. тех. наук, доц.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Стройиндустрия эволюционирует по направлению не только производства, но и повышения значимости роли химических и физико-химических процессов. Строительное материаловедение достигло определенных успехов в создании композитов, обеспечивающих безопасность зданий и сооружений, в том числе от определенных природных техногенных воздействий. Новый этап в строительном материаловедении предусматривает и технологию создания строительных композитов, комфортных для конкретной личности. Для реализации этого необходима новая парадигма проектирования и синтеза строительных материалов с применением новой сырьевой базы. В рамках этого сформировано понятие техногенного метосоматоза в строительном материаловедении, закон сродства структур, возможность создания композитов, реагирующих на эксплуатационные нагрузки путем самозалечивания дефектов.

Ключевые слова: геоника (геомиметика), трансдисциплинарность, интеллектуальные материалы, техногенное сырье, техногенный метасоматоз, стеновые материалы.

Главной задачей ученых всего мира является создание комфортной среды обитания человека или оптимизация системы «человек-материал-среда обитания».

Это сложнейшая задача, которую невозможно решить при помощи моно- и междисциплинарного подхода. Исследование сложных систем возможно только за счет трансдисциплинарных исследований.

На данном этапе развития науки и техники перед учеными стоят сложные задачи по совершенствованию существующих материалов, обуславливающих существенный технический и экономический эффект благодаря уникальному сочетанию свойств, наметились тенденции создания новых материалов, способных к активному взаимодействию с внешними факторами. Такие материалы получили названия

«интеллектуальных». Они способны «ощущать» свое физическое состояние, внешние воздействия и особым образом реагировать на эти «ощущения», т.е. способны осуществлять самодиагностику по возникновению и развитию дефекта, его устранение и стабилизировать свое состояние в критических зонах [1-2].

Существенное повышение их эксплуатационных характеристик обусловлено эволюцией в материаловедении, которая развивается по направлению уменьшения размеров слагающих композит частиц и особенно ярко эта тенденция проявляется в металлургии, керамики и строительном материаловедении в том числе.

Для реализации этого направления нужна и эволюция в применяемых сырьевых ресурсах. Для повышения эффективности бетонов необходимо использовать новые сырье, в том числе подготовленные геологическими процессами горные породы: кварцсодержащие разновидности зеленосланцевой степени метаморфизма, пелиты незавершенной стадии минералообразования, нанопорошки из гидротермальных источников вулканогенных областей, вулканогенно-осадочные и в целом эффузивные горные породы и др.

Будущее строительного материаловедения во многом связано с разработкой теоретических основ управления процессами формирования структуры композитов, способных, взаимодействуя со средой обитания человека, самовостанавливаться при образовании микрорекрестов – это тренд мирового уровня [3-7].

Реализация теоретических положений и системный подход к решению сформулированных проблем решается в рамках нового научного направления геоника (геомиметика). Выполняемая научно-исследовательская работа позволила разработать методологические основы создания эффективных строительных композитов нового поколения, при проектировании которых заложена система взаимодействия с окружающей средой, позволяющая материалам реагировать на внешние воздействия и положительно влиять на триаду «человек-материал-среда обитания». Разработан алгоритм управления процессами структурообразования при создании интеллектуальных композитов, способных под воздействием внешней среды изменять свои свойства. Это самоорганизующаяся система.

При проектировании интеллектуальных строительных композитов необходимо управлять процессами структурообразования на всех уровнях, что позволит материалу реагировать на возникновение экстремальных ситуаций, при эксплуатации зданий и сооружений.

Реализация теоретических положений и системный подход к решению сформулированных проблем решалась в рамках нового научного направления геоника (геомиметика). Это позволило разработать методологические основы для создания эффективных строительных композитов нового поколения.

Разработана концепция повышения эффективности строительства в сейсмоопасных условиях с использованием нового класса «интеллектуальных» силикатных автоклавных материалов конструкционно-теплоизоляционного назначения с существенно улучшенной сейсмостойкостью. Для чего предложена разработка активных гранулированных заполнителей с растворяющимся ядром при автоклавной обработке [8-9]

Стеновые материалы полученные по данной технологии имеют существенно более развитую поверхность чем традиционные стеновые материалы (рис. 1). Образующиеся на месте гранул каверны существенно повышают прочность кладки, а с учетом применения специально разработанного кладочного раствора позволяет увеличить прочность кладки на срез в разы, что особенно актуально для строительства в сейсмоопасных зонах (рис. 2).

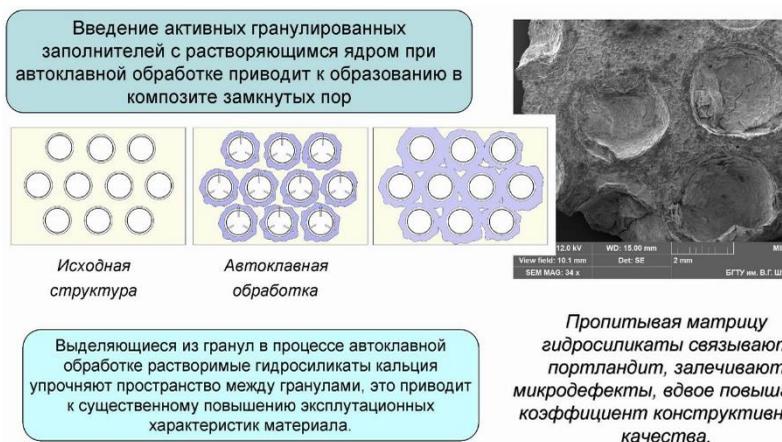


Рисунок 1 – Конструкционно-теплоизоляционный стеновой материал и композиционного кладочного раствора для сейсмостойкого строительства

Разработанная технология является алгоритмом для создания нового класса «интеллектуальных» конструкционно-теплоизоляционных силикатных автоклавных материалов.



Рисунок 2 – Характер разрушения силикатных материалов с АГЗ при использовании упрочненных кладочных растворов

Предложена теория техногенного метасоматоза в строительном материаловедении. Это стадия в эволюции строительного материаловедения, характеризующаяся приспособлением композита к изменяющимся при эксплуатации зданий и сооружений условиям.

Одним из механизмов техногенного метасоматоза являются противоречия между вещественным составом и структурой строительных композитов и новыми термодинамическими условиями в которое они попадают во время строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Это сложнейшие процессы (рис. 3.), включающие перекристаллизацию, диффузию, дегидратацию, кристаллохимические превращения, трансформацию в кристаллических решетках минерала, аутогенез (выделение твердой фазы и растворы) и т.д [10-11].

Проектирование строительных композитов с учетом теории техногенного метасоматоза в строительном материаловедении позволяет предусмотреть возможность самозалечивания дефектов, возникших при эксплуатации зданий и сооружений и получать так называемые «интеллектуальные» композиты.

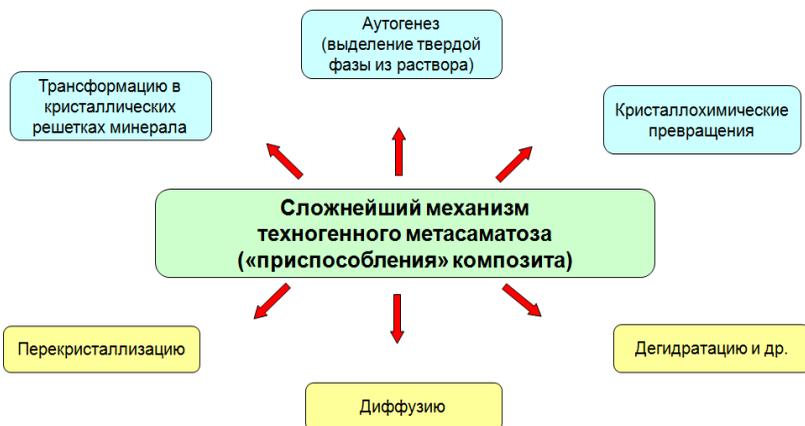


Рисунок 3 – Сложнейший механизм техногенного метасоматоза

При бетонировании в условиях жаркого сухого климата возникает множество различных проблем, связанных, как и с высокой температурой бетона, так и усиленным испарением воды из свежееуложенной смеси. Эти проблемы требуют соблюдения определённых условий при перемешивании смеси, её укладки и уходе за бетоном [12].

Предлагаются система внутреннего ухода заключающиеся в целенаправленном синтезе новообразований и получении микроструктур на начальных этапах создания композита с использованием вулканического туфа.

Предлагаемый подход апробирован на композиционных вяжущих на основе туфа, создающих наиболее благоприятные условия на ранних стадиях структурообразования и твердения систем. Это приводит к снижению напряжений в твердеющем композите и, как следствие, к уменьшению количества и размеров микротрещин, что предопределяет технико-экономическую эффективность применения КВ на основе туфа, особенно в условиях сухого жаркого климата. Известно, что вулканический туф является гетеропористой горной породой. Поровое пространство данной породы, является весьма сложным по своей форме и состоит из сочетания пор различных размеров (рис. 4).

Вода в породе находится в сложном взаимодействии с ее минеральным каркасом, границы и соотношения между ними условны и постоянно изменяются: пар; химически и физически связанная вода; свободная или гравитационная вода.

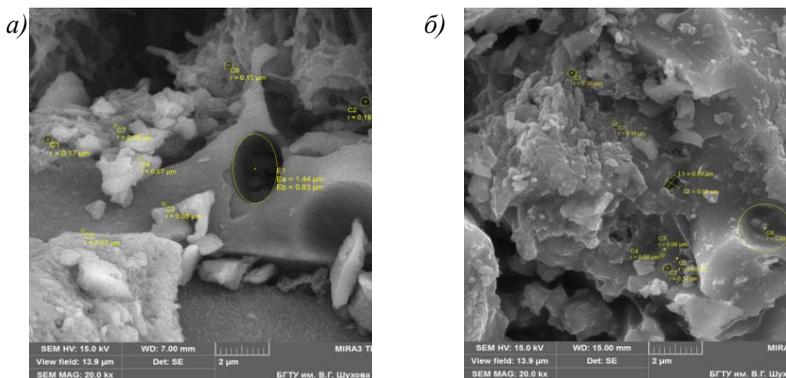


Рисунок 4 – Микрофотографии поверхности:
а - вулканического туфа; *б* - туфового порошка

В условиях эксплуатации, возникаемых при различных нагрузках микротрещины, самоликвидируются за счет взаимодействия влаги, содержащейся в частицах туфа, с непрореагировавшими клинкерными минералами. Частицы туфа в процессе эксплуатации отдают запасенную ими капиллярно-удержанную воду, а это приведет к активизации процессов структурообразования и синтезу более плотной однородной структуры материалов в процессе твердения и эксплуатации бетонов, это так называемые интеллектуальные композиты.

Проведение таких мероприятий позволило повысить предел прочности при сжатии бетона до 128 МПа, предел прочности на растяжение при изгибе 35 МПа, модуль упругости до 83×10^{-3} МПа [12].

Получены композиционные вяжущие на основе минеральных добавок содержащих отсеvy дробления кварцитпесчаника и мела. Использование в данной системе положительно и отрицательно заряженных частиц позволяет улучшить реологические характеристики смеси и оптимизировать процесс структурообразования. Оптимизация зернового состава композиционных вяжущих в ходе их помола, ведет к сокращению объема межзерновых пустот и повышению дисперсности вяжущего что приводит к увеличению числа контактов и как следствие, ускоренному нарастанию прочности, созданию некоторого запаса негидратированных клинкерных минералов, необходимого для «залечивания» имеющихся и возникающих микродефектов (рис. 5).

При проектировании бетонных смесей и бетонов на разработанных вяжущих был реализован принцип полной утилизации всех фракций отсевов дробления КВП в технологическом цикле производства одного вида продукции.

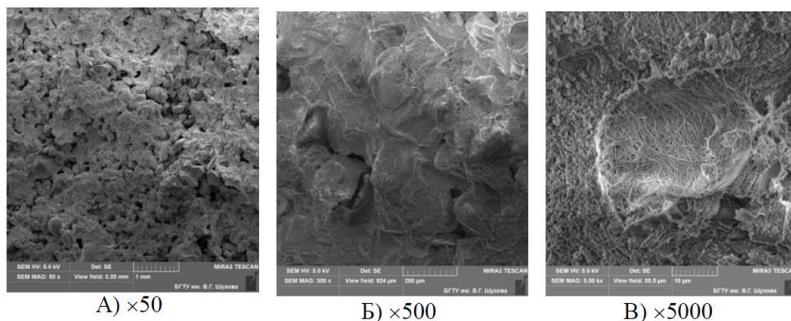


Рисунок 5 – Характер излома композиционного вяжущего

Получены высокоэффективные композиционные вяжущие, содержащие в качестве минеральной добавки бой различных стеновых материалов. Широкая номенклатура строительных растворов на этих композиционных вяжущих способны удерживать и аккумулировать влагу, необходимую в процессе твердения и эксплуатации. Благодаря синтезу новообразования обеспечивается постепенное поступление влаги к гидратирующимся клинкерным частицам за счет чего образуется базовая матрица. Образование системы аналогичной базовой матрице позволяет создать единый массив, что обеспечивает увеличение прочности и способствует «залечиванию» микротрещин.

Разработанные композиционные вяжущие, при их выборе с учетом родства [13] к основному стеновому материалу, позволяют получать кладочные растворы, по совокупности значимых показателей в 2-3 раза превосходящие традиционные и дешевле по стоимости сухих строительных смесей аналогичного назначения (табл. 1).

Таблица 1 – Адгезия полученных КВ к различным строительным материалам

Состав (вяжущее)	Адгезия к основанию, МПа		
	Керамический кирпич	Силикатный кирпич	Цементный бетон
P1 (КВ40Гс)	0,55	0,57	0,39
P2 (КВ40Ск)	0,49	0,48	0,43
P3 (КВ40Кк)	0,61	0,34	0,48
P4 (КВ40Кб)	0,77	0,34	0,52
P5 (КВ40Тб)	0,51	0,31	0,59
P6 (КВ40Кп)	0,34	0,29	0,76
ССС «Р-10»*	0,53	0,38	0,64
ЦИП**	0,33	0,37	0,48

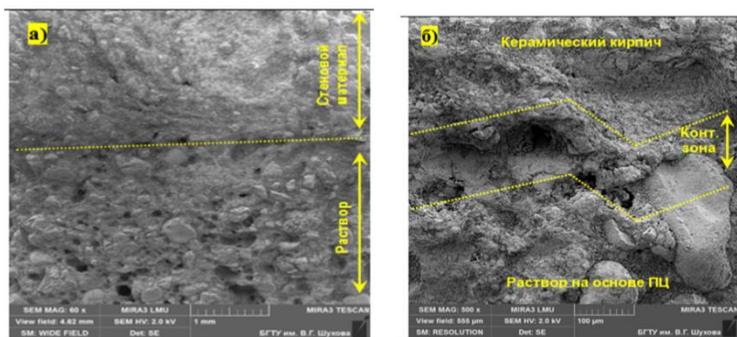
Сформулирован закон сродства структур для анизотропных материалов, предполагающий проектирование слоистых композитов и ремонтных систем на нано-, микро- и макро уровне аналогичных базовой матрице, что приводит к существенному повышению адгезии и долговечности материалов [14-15]. Основой для формулировки закона стала информация, полученная при изучении природных аналогов анизотропных и изотропных строительных композитов (рис. 6).



Рисунок 6 – Адгезия в зависимости от породы образцов

Установлено, что горные породы независимо от генезиса (магматические, метаморфические и осадочные) имеющие полосчатую текстуру, слои которых представлены минералами, у которых

деформативные характеристики и коэффициент теплового расширения существенно отличается друг от друга, не только недолговечны, но и имеют коэффициент анизотропии 7-9 и более в отличие от прототипов с коэффициентом анизотропии 2-3. Повышение предела прочности на разрыв кладки с предложенными составами в 3-5 раз объясняется микроструктурой контактной зоны, например керамического кирпича и раствора (рис. 6). Разработанный кладочный раствор и стеновой материал практически единый монолит, а конструкции на традиционном вяжущем четко видна зона контакта- самое слабое место образцов.



Кладочный раствор
с учетом закона сродства структур

Традиционный кладочный раствор

Рисунок 6 – Влияние составов кладочных растворов на строение контактной зоны

Реализация этого закона позволяет создать композит у которого все составляющие имеют близкие деформативные и температурные характеристики. Применение этого закона позволило создать реставрационные смеси, штукатурные, кладочные и ремонтные составы нового поколения применительно к каждому виду стенового поколения [15].

Таким образом новое трансдисциплинарное направление геоника (геомиметика) является фундаментальной базой строительного материаловедения, уделяющей большое внимание созданию новых высокопрочных, интеллектуальных материалов с упорядоченной регулируемой структурой, формирующей новообразования, которые обладают высокой прочностью и низкой теплопроводностью,

способностью самозалечивать дефекты структуры и ликвидировать разупрочняющую пористость.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08002 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Гридчин А.М., Баженов Ю.М., Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Пушкаренко А.С., Василенко А.В. Строительные материалы для эксплуатации в экстремальных условиях. Москва. 2008 г.
2. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика) как трансдисциплинарное направление исследований // Высшее образование в России. 2014. № 3. С. 77-83.
3. Lesovik V.S. Geonics. Subject and objectives. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 100 с.
4. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – 206 с.
5. Лесовик В.С. Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1994. № 7-8. С. 96-100.
6. Lesovik, W.S., Gridchin A.M. Zum Problem der Forchung des System Mensch-Stoff-Umwelt., 12. Ibaus. Internationale Baustofftagung. Weimar, 1994. С. 678-684
7. Лесовик В.С. Снижение энергоемкости производства строительных материалов за счетиспользования энергетики геологических и техногенных процессов / 18. Ibaus. Internationale Baustofftagung. Weimar, 2012. Т 1. С.183-189
8. Лесовик В.С., Мосьпан А.В. Прессованные силикатные изделия на гранулированных заполнителях // Известия КГАСУ. 2012. №3. С. 144-150.
9. Лесовик В.С., Мосьпан А.В., Беленцов Ю.А. Силикатные изделия на гранулированных заполнителях для сейсмостойкого строительства // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2012. №4. С. 62-65.
10. Лесовик В.С. Техногенный метасаматоз в строительном материаловедении / Международный сборник научных трудов «Строительные материалы 4С: состав, структура, состояние, свойства». Новосибирск. 2015. С. 26–30.
11. Лесовик В.С., Володченко А.А. К проблеме техногенного метасаматоза в строительном материаловедении / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 38-41.

12. Шакарна М.Х. Композиционные вяжущие с использованем вулканических туфов Иордании // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №3 С.38-43
13. Прасолова Е.О., Куприна А.А. Закон сродства структур – основной принцип проектирования многослойных систем. «Наука вчера, сегодня, завтра» / Сб. ст. по материалам XIII междунар. науч.-практ. конф. № 6 (13). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. С.35-40
14. Лесовик В.С., Л.Х. Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л. Закон сродства структур в материаловедении // Фундаментальные исследования. 2014. № 3. Ч. 2. С. 267-271.
15. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С. Повышение эффективности производства сухих строительных смесей. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 548 с.

ФИБРО-ТЕКСТИЛЬ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПЕСКОВ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

ruslan_lesovik@mail.ru

Лесовик Р.В., д-р техн. наук, проф.,

Агеева М.С., канд. техн. наук, доц.,

Клюев С.В., канд. техн. наук, доц.,

Лесовик Г.А., канд. техн. наук,

Сопин Д.М., канд. техн. наук

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Аннотация. Одна из актуальнейших проблем XXI века – энергосбережение, особенно это касается промышленности строительных материалов РФ. Так на одну единицу продукции затраты энергоносителей в России в 2-3 раза выше, чем в развитых странах мира.

Отсутствие концепции использования техногенных песков, их классификации, принципов оценки качества и технологии рационального использования тормозит широкомасштабное использование этого техногенного сырья в промышленности строительных материалов в целом и при производстве бетонов в частности.

Ключевые слова: дисперсно-армированный бетон, композиционные вяжущие, техногенное сырье, отходы мокрой магнитной сепарации, отсева дробления кварцитопесчанника.

На нынешнем этапе объемы как текущих отходов, так и техногенных месторождений несоизмеримо большие, чем потребности в сырье на предприятиях промышленности строительных материалов. Поэтому проблема реализации остро стоит в нашем регионе. Очень важно из всей массы выделить те, которые можно наиболее эффективно использовать для получения строительных материалов как при проектировании новых производств, так и на имеющихся в нашем регионе промышленных мощностях [1-6].

Отсутствие концепции использования техногенных песков, их классификации, принципов оценки качества и технологии рационального использования тормозит широкомасштабное использование этого техногенного сырья в промышленности

строительных материалов в целом и при производстве бетонов в частности [7-11].

Проблему рационального использования техногенного сырья необходимо рассматривать с точки зрения трех уровней: проектируемые к освоению месторождения; текущие отходы; техногенные месторождения

В работе с учетом законов формальной логики разработана научная классификация техногенных песков. В основу разделения песков на классы положены условия их получения. По этому критерию все пески подразделяются на природные и техногенные (рис.1).

Существенное отличие техногенных песков от природных, обусловленное технологическими операциями, генезисом и составом исходных пород, влечет за собой ряд коренных изменений в параметрах, обуславливающих формирование техногенных песков как высокоактивных и энергонасыщенных компонентов твердеющих систем (рис.2).



Рисунок 1 – Трансформация вещества при техногенезе и проблемы использования техногенных песков

Основные экспериментальные исследования проводились в Центре высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, испытательном центре «БГТУ - сертис», в лабораториях кафедр архитектурно-строительного института и института строительного материаловедения Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова.

Исследования структурно-фазового состояния проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ARLX'TRA;

рентгенофлуоресцентный анализ элементов - ARL9900 Intellipower Workstation.

Для получения микрофотографий поверхности, размера зерен, микроструктуры затвердевших вяжущих был использован сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU, включающий энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) X-MAX 50 Oxford Instruments NanoAnalysis для электронно-зондового микроанализа.



* Изменение любого из данных структурообразующих факторов приводит к изменению микроструктуры искусственного композита

Рисунок 2 – Структурообразующие факторы, влияющие на микроструктуру техногенного сырья

Установлен характер влияния состава и структурно-текстурных характеристик скальных пород Белгородской области различного генезиса на гранулометрию отсева дробления, физико-механические характеристики, водо- и цементопотребность техногенных песков в зависимости от положения в системе классификации (рис.3).

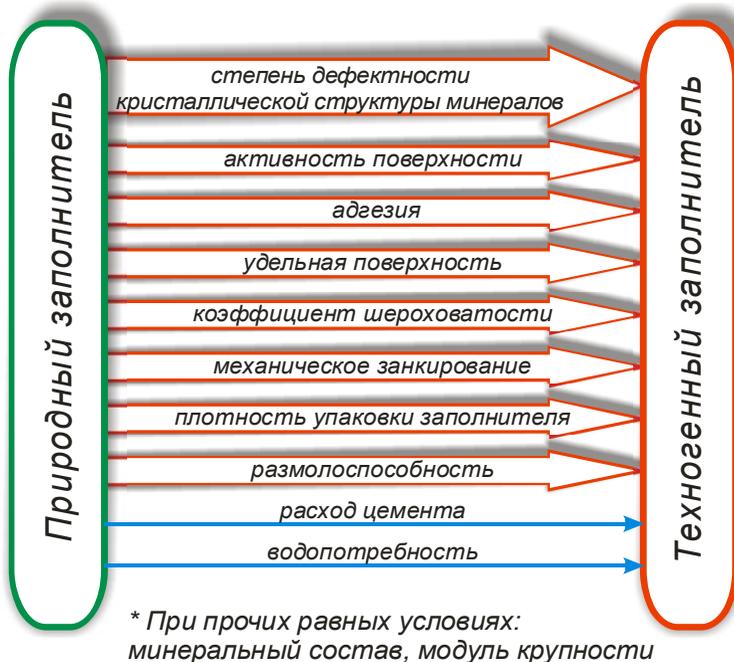


Рисунок 3 – Характер изменения свойств заполнителя техногенного и природного происхождения.

Предлагается методика определения качества песков для производства бетонов, заключающаяся в определении прочности образцов состава цемент-песок (1:4) с определенной подвижностью (табл. 1). Так как именно эти составы наиболее полно отражают роль песка. При увеличении доли цемента, роль песка в анализируемом составе уменьшается.

Высококачественный техногенный песок образуется при дроблении средне- и крупнозернистых магматических и метаморфических скальных пород равномернозернистой структуры и массивной текстуры. Существенно снижаются качественные показатели у

техногенных песков, полученных из пород мелко- и тонкозернистой структуры особенно осадочного происхождения и у пород анизотропной текстуры.

Таблица 1 – Свойства техногенных и природных песков и мелкозернистого бетона в зависимости от вида заполнителя

Наименование заполнителя	Мкр	Цементо-потребность, %	Водо-потребность, %	Рж МПа	Коэфф. качества песка (ККП)
Отсев дробления КВП фракции 0,315–5 мм	4,7	0,5	6,5	32,5	1,75
Отсев дробления гранита	3,3	0,71	7,8	30,6	1,6
Отсев дробления валунно-песчано-гравийных смесей Северного Кавказа	3,8	0,57	8,5	25,9	1,4
Отсев дробления КВП	3,7	0,95	8,5	23,6	1,27
Песок Вольского Месторожде-ния	2,5	0,49	4	18,6	1
Песок Нижне-Ольшанского месторождения	1,3	0,64	7,5	9,8	0,53
Отходы ММС	0,8	1,96	21	6,1	0,33

Примечание: Для примера в таблицы приведены исследования песков других регионов

Коэффициент качества песка (ККП) рассчитывается по следующей формуле:

$$ККП = \frac{R_i}{R_{a.i}}$$

где R_p – предел прочности при сжатии мелкозернистого бетона на изучаемом песке;

$R_{в.п.}$ – предел прочности при сжатии мелкозернистого бетона на песке Вольского месторождения

Разработана классификация техногенных песков Белгородской области в зависимости от состава, генезиса исходных пород и вида

техногенных воздействий, а также принципы оценки их качества.

Анализ строения и вещественного состава техногенных песков, а также закон соответствия генезиса техногенезу при производстве строительных материалов с минимальными энергозатратами позволили определить рациональные области их использования при производстве композиционных вяжущих и мелкозернистых бетонов.

Получение высокоэффективных вяжущих веществ нового поколения сегодня сопровождается использованием сложных составов компонентов. В работе разработаны композиционные вяжущие с оптимизированным с учетом генезиса и морфологии поверхности частиц гранулометрическим составом минеральных компонентов.

Были получены различные составы вяжущих: тонокомолотый цемент (ТМЦ 100) и композиционные вяжущие, состоящие из цемента и добавок (КВ 100 и КВ 80 ММС). В качестве основы для получения таких вяжущих был выбран ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент» (г. Белгород). Композиционное вяжущее получали путем домола портландцемента с пластифицирующей добавкой «Полипласт ПРЕМЕИУМ» в вибромельнице до удельной поверхности 600 м²/кг (табл.2).

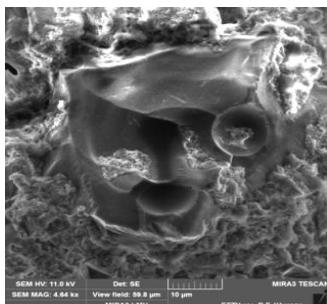
Таблица 2 – Физико-механические характеристики композиционных вяжущих

Наименование вяжущего	Удельная поверхность, м ² /кг	Начало схватывания, час.	Конец схватывания, час.	Активность	
				при изгибе, МПа	при сжатии, МПа
ЦЕМ I 42,5Н	320	2,30	3,30	7,8	51,3
ТМЦ – 100	600	2,15	3,15	15,2	67,4
КВ-100	600	1,50	2,50	18,1	78,9
КВ-80 (ММС)	600	2,05	3,00	10,9	56,9
КВ-80 (шлак)	600	3,20	4,00	15,7	62,1

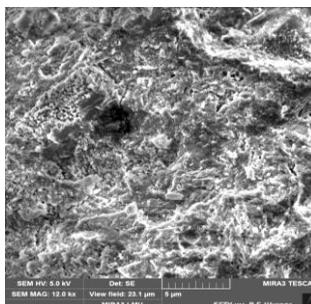
Как видно из результатов исследований вяжущее КВ-100 характеризуется более высокой активностью по сравнению с цементом ЦЕМ I 42,5 Н и ТМЦ-100.

Структура цементного камня самих композиционных вяжущих

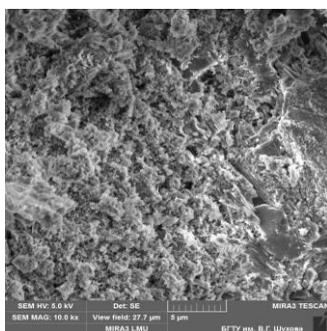
более плотная, с меньшей пористостью по сравнению с цементным камнем (рис.4). У КВ с наполнителем после формирования в начальном процессе гидратации частички добавки адсорбируют значительное количество воды, тем самым снижая водовяжущее отношение, а это приводит к активизации процессов структурообразования и синтезу более мелких кристаллов гидросиликатов кальция, что несомненно отражается на оптимизации микроструктуры цементного камня по сравнению с контрольными образцами.



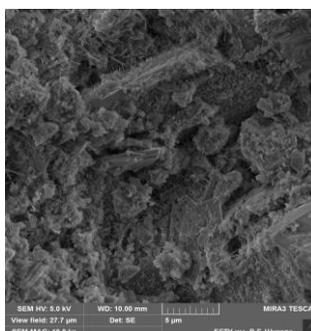
КВ-80 (шлак)



КВ-100



ТМЦ-100



КВ-80 (ММС)

Рисунок 4 – Микроструктура композиционных вяжущих

Установлено, что оптимизация процессов структурообразования композиционных вяжущих происходит за счет последовательного роста новообразований при твердении системы «клинкерные минералы–наполнитель–вода–суперпластификатор», обусловленного разной

интенсивностью и временем взаимодействия частичек наполнителя с продуктами гидратации клинкерных минералов с учетом генезиса и морфологии поверхности частиц.

Конструкционные композиты на текстильной основе становятся передовым строительным материалом, особенно подходящим для разнообразных легковесных строительных конструкций. Использование текстиля в качестве арматуры для бетона является относительно новой областью исследований. Текстиль-бетон дает экономический эффект главным образом за счет более высокой долговечности, износостойкости, эксплуатационной пригодности, увеличения межремонтного ресурса и повышения безопасности сооружений при сейсмических воздействиях и пожарах [9– 14].

Взаимодействие между волокнами и матрицей – фундаментальное свойство, которое влияет на качество основанного на цементе волокнистого композиционного материала. Были исследованы свойства бетонов при варьировании длины волокна и процента армирования стекловолокном (табл.3).

Использованное в экспериментах цементостойкое волокно выпускается в виде ровинга РЦР-15-190-2520-9. Цифры обозначают: диаметр элементарного волокна в мкм – 15; линейная плотность комплексной нити – 190; линейная плотность ровинга – 2520; номер замасливателя – 9. Разрывная нагрузка ровинга – 500 Н; предел прочности при растяжении – 1600 МПа; предельная деформация при растяжении 2,2%; модуль упругости – 72 ГПа; модуль сдвига – 29,1 ГПа.

Для формования образцов использовались доступные местные материалы. Использовался песок, применяемый для изготовления мелкозернистого бетона. Его характеристики определялись по методикам ГОСТ 8835-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Модуль крупности песка – 2,56; насыпная плотность – 1700 кг/м³.

Таблица 3 – Результаты испытаний образцов из стеклофибробетона

NN серий образцов	волокна		ρ , кг/м ³	σ_{bf}		σ_t	
	длина, мм	% по массе		велич., МПа	прирост, %	велич., МПа	прирост, %
без волокон			2250	23,0		3,6	
ЦЕМ I 42,5 Н	50	4,5	2160	17,0	-26,1	10,0	172,8
КВ-80 ММС	50	4,5	2190	23,0		10,8	200
КВ-80 шлак	50	4,5	2260	25,5	10,8	11,5	219
КВ-100	50	4,5	2200	29,3	27,4	11,7	225

Анализ результатов показал положительное влияние композиционных вяжущих как на прочность при сжатии, так и на прочность при растяжении при изгибе.

Рациональный подбор заполнителя и наполнителя, а также использование стекловолокна в оптимальной дозировке позволили увеличить прочности бетона на растяжение при изгибе на 172% на портландцементе и до 225 % на композиционном вяжущем.

Выбор длины и процента армирования был основан на ранее проведенных экспериментах, в результате которых было установлено, что при введении стекловолокна в количестве 4,5% и более наблюдается тенденция к снижению предела прочности бетона при сжатии. При введении стекловолокна в количестве 1,5 и 3% с длиной волокон 20 и 35 мм наблюдается повышение прочности бетона при сжатии (до 28%), а при увеличении длины волокна до 50 мм она имеет тенденцию к снижению.

Анализ результатов показал положительное влияние композиционных вяжущих как на прочность при сжатии, так и на прочность при растяжении при изгибе.

Микроструктура композиции, основанной на КВ, оказывает существенное влияние на свойства композита (рис.5). Затвердевшее тело содержит поры переменных размеров. Значительное изменение объема происходит вследствие ползучести и усадки при изменении температуры и влажности.

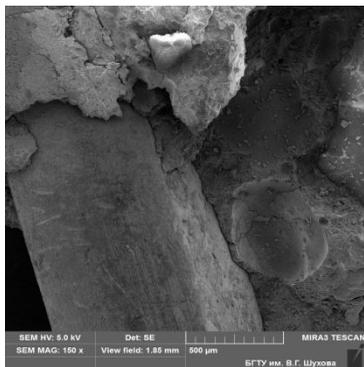


Рисунок 5 – Микрофотография контактной зоны фибры и композиционного вяжущего

Зона взаимодействия матрицы и волокна существует вплоть до 50 мкм вглубь поверхности волокна. Эта зона содержит пленку толщиной приблизительно 1-2 мкм, которая окружает волокно. Вклад зоны взаимодействия в механические свойства композита определяется процессом связывания и отслаивания волокна. Выявлен микроармирующий эффект наполнителя композиционного вяжущего за счет кремнеземсодержащих компонентов матрицы, что объясняется удлинением габитуса

частиц, микрошероховатостью поверхности и высокой адгезией частиц наполнителя к цементному камню, которая и предопределяет наилучшее сцепление цементного камня с фиброй.

Также в работе были разработаны составы текстиль бетонов на основе стекловолокна с учетом оптимальной дозировки фибры, тонкомолотых минеральных компонентов, вяжущего и добавок (табл.4).

Использование тонкомолотых с удельной поверхностью 500 м кв./кг минеральных наполнителей таких, как доменный гранулированный шлак, карбонатные породы, отсев дробления кварцитопесчаника, а также применение стеклофибры длиной 35 мм в количестве 1,5 % позволило получить бетоны с повышенной прочностью на сжатие выше, чем у состава на традиционном заполнителе на 43 %, на растяжение при изгибе до 180 %.

Таблица 4 – Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона в зависимости от состава

№	Расход материалов на 1м3						В/В	Предел прочности при сжатии, R, (МПа)	Предел прочности при изгибе, R, (МПа)
	Вяжущее, кг		Песок, кг	Вода, л	Тонкомолотые минеральные добавки (Sуд=500)	Стеклоянная фибра, кг/м3			
	Ц	СП							
1	560	45	1250	165-175			0,3	35.1	7.3
2	560	45	1250	165-175		1,5% от массы компонентов	0,3	40.1	9.1
3	560	45	1250	165-175	Квп 190		0,3	38.8	7.8
4	560	45	1250	165-175	Шлак190		0,3	43.1	8.0
5	560	45	1250	165-175	Квп 190	1,5% от массы компонентов	0,3	47.5	9.4
6	560	45	1250	165-175	Шлак190	1,5% от массы компонентов	0,3	54.0	10.7
7	560	45	1250	165-175	Квп 85 Шлак 85 Мел 20		0,3	50.1	8.5
8	560	45	1250	165-175	Квп 85 Шлак 85 Мел 20	1,5% от массы компонентов	0,3	65.0	11.7

Микроструктура затвердевшего композита состава 8, как наиболее оптимального, характеризуется более низким содержанием кристаллического портландита, который частично связан шлаковыми зернами и более плотной гидросиликатной структурой (рис.6).

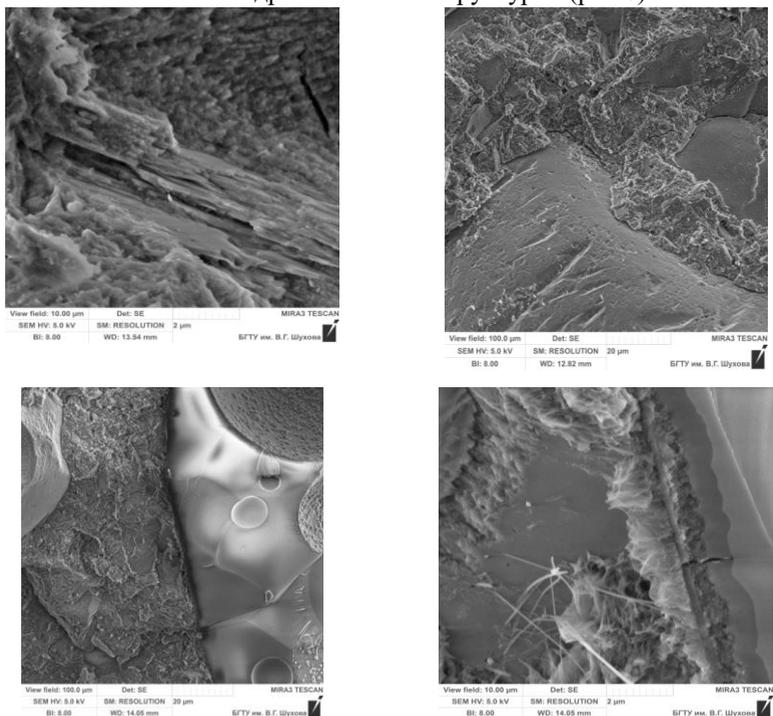


Рисунок 6 – Микроструктура композитов на основе активных минеральных добавок

Поэтому при введении в КВ тонкомолотого доменного гранулированного шлака в качестве наполнителя интенсифицируется реакция взаимодействия поверхностей наполнителя с гидроксидом кальция при этом на контактном слое вяжущего и наполнителя образуются слои гидросиликатов кальция, обеспечивающие их срастание друг с другом. Это будет способствовать возникновению высокой водонепроницаемости и устойчивости к агрессивным средам. Частицы шлака, кварцитопесчаника и мела имеют хорошую адгезию с

цементным камнем. С увеличением удельной поверхности возрастает положительный эффект минеральных добавок, потому как размер их частиц соизмерим с размерами частиц цемента. Образовавшиеся гидросиликаты кальция будут обеспечивать повышение прочности и плотности цементного камня и, как следствие, бетона за счет захвата активной части добавки в структуру твердеющего цементного камня. Помимо этого, мельчайшие частицы наполнителя, как и непрогидратировавшие цементные зерна, также являются дополнительными центрами кристаллизации.

Таким образом, проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил существенно расширить сырьевую базу промышленности строительных материалов и разработать принципы проектирования и технологии производства эффективных текстиль-бетонов на основе композиционных вяжущих и техногенных песков для производства широкой номенклатуры изделий.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08006 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Лесовик Р.В., Агеева М.С., Лесовик Г.А., Богусевич Г.Г., Шаповалов С.М., Сопин Д.М. Повышение эффективности крупнопористого керамзитобетона за счет использования композиционных вяжущих из техногенного сырья различной природы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 58-62.
2. Агеева М.С., Шаповалов С.М., Боцман А.Н., Ищенко А.В. К вопросу использования промышленных отходов в производстве вяжущих веществ // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 9. С. 58-62.
3. Лещев С.И., Лесовик Р.В., Агеева М.С., Карацупа С.В. Анализ влияния добавки цеолитсодержащего трепела на микроструктурные характеристики матрицы композиционных вяжущих // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 3 (28). С. 14-20.
4. Lesovik R.V., Ageeva M.S., Pukharensko Yu.V., Lesovik G.A., Popov D.Yu. Textile fiber concrete on the basis of the composite binding materials // В сборнике: 19-te INTERNATIONALE BAUSTOFFTAGUNG IBAUSIL 2015. 2015. С. 1167-1171.
5. Лесовик Р.В., Агеева М.С., Клюев С.В., Лесовик Г.А., Сопин Д.М. Разработка композиционных вяжущих и мелкозернистых

- фибробетонов на их основе // Региональная научно-техническая конференция по итогам ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области сборник докладов. 2016. С. 199-212.
6. Лесовик Р.В., Агеева М.С., Клюев С.В., Лесовик Г.А., Сопин Д.М. Разработка методологии проектирования мелкозернистых фибротекстиль бетонов на техногенных песках белгородской области // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 227-241.
 7. Ageeva M.S., Lesovik R.V., Erofeev V.T., Sopin D.M., Lesovik G.A. The efficient composite building materials of the iron and steel industry waste* // В сборнике: 19-te INTERNATIONALE BAUSTOFFTAGUNG IBAUSIL 2015. 2015. С. 1433-1435.
 8. Клюев С.В., Клюев А.В., Лесовик Р.В. Оптимальное проектирование высококачественного фибробетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 119-121.
 9. Ахмед А.А.А., Лесовик Р.В., Сопин Д.М. Фибробетон с углеродным волокном на сырьевых ресурсах республики Ирак В сборнике: Научные и инженерные проблемы строительно-технологической утилизации техногенных отходов Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2014. С. 63-66.
 10. Лесовик Р.В., Клюев С.В., Клюев А.В., Нетребенко А.В.К проблеме использования техногенных песков Курской магнитной аномалии для производства мелкозернистого фибробетона и изделий на его основе // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 12. С. 45-48.
 11. Клюев С.В., Лесовик Р.В., Казлитина О.В., Нетребенко А.В., Калашников Н.В., Митрохин А.А. Комбинированное дисперсное армирование мелкозернистого бетона на техногенном сырье и нанодисперсном модификаторе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 47-53.
 12. Лесовик Р.В., Авилова Е.Н., Ряпухин Н.В. Строительство укрепленных оснований автомобильных дорог с использованием метаморфических сланцев КМА// Технологии бетонов. 2014. № 9 (98). С. 12-13.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АСПИРАЦИИ И РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ

nvm84@ya.ru

Логачев А.К., аспирант,
Крюков И.В., аспирант,
Попов Е.Н., ст. преподаватель,
Семиненко А.С., ст. преподаватель,
Крюкова О.С. аспирант

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

Аннотация. В статье представлены основные результаты и выводы, полученные в ходе исследования закономерностей отрывных, закрученных, рециркуляционных и вихревых пылегазовых потоков в системах обеспыливающей вентиляции, которые базируется на разработанных методах и алгоритмах математического моделирования, а также проведенных натуральных экспериментах.

Ключевые слова: обеспыливающая вентиляция, аспирация, аспирационное укрытие, рециркуляция воздуха, вращающийся цилиндр-отсос, отрывные течения, дискретные вихри, щелевая неплотность, отсос-раструб, всасывающий патрубок.

В данной работе кратко излагаются результаты исследований по проекту РФФИ № 14-41-08005 «р_офи_m». Более полное изложение указанных результатов осуществлено в трудах [1-31].

Целью проекта было раскрытие закономерностей отрывных, закрученных, рециркуляционных и вихревых пылегазовых потоков в системах аспирации на основе разработанных методов и алгоритмов математического моделирования и натуральных экспериментов.

Были решены следующие задачи.

Исследованы отрывные и вихревые течения в спектрах вытяжных каналов. Определены очертания вихревых областей, динамика развития вихревой структуры течения, взаимодействия вытяжного факела и приточных струй. Исследовано поведение одиночных пылевых частиц и полидисперсной совокупности пылевых частиц в спектрах действия вытяжных каналов.

Рассмотрены задачи аэродинамики перегрузок сыпучих материалов в пористых каналах по определению закономерностей рециркуляции воздуха в байпасных каналах. С использованием численного и натурального экспериментов доказано, что явление рециркуляции воздуха способствует снижению расхода эжектируемого воздуха.

Развиты теоретические основы расчета местных отсосов аспирационных укрытий перегрузочных узлов сыпучих материалов – наиболее характерных и распространённых источников пылевыделения при переработке пылящих материалов.

На основе метода граничных интегральных уравнений разработана имитационная модель разгрузки сыпучего материала в приёмные воронки корпусов крупного дробления. Произведен анализ процесса разгрузки думпкаров в приёмную воронку корпуса крупного дробления горно-обогатительного комбината. Выведены расчётные соотношения для определения расхода воздуха, увлекаемого сыпучим материалом.

Разработана математическая модель, вычислительный алгоритм и компьютерная программа для расчета отрывных течений на входе в круглые отсосы-раструбы и для исследования поведения пылевых частиц в спектре их действия.

На разработанной экспериментальной установке аспирационного укрытия со щелевой неплотностью проведены экспериментальные исследования влияния горизонтальных, вертикальных, двухгранных непроницаемых пластин (козырьков) на к.м.с. входа в щелевую неплотность. Определены параметры экранов, способствующие наибольшему снижению расхода воздуха.

Развиты методы расчета аспирации при загрузках бункеров силосного типа полидисперсным материалом. Предложен новый статистический подход к учёту условий стеснённости на коэффициент лобового сопротивления частиц, в условиях свободной струи падающего материала.

Для исследования рециркуляционных течений получены и решены гидродинамические уравнения для оценки межкомпонентного взаимодействия в вертикальном перфорированном желобе при перемещении в них гравитационных потоков сыпучего материала и эжектируемого воздуха. Рассмотрен случай, когда рециркуляция восходящего в байпасной камере воздуха осуществляется как через отверстия равномерной перфорации стенок желоба, так и через торцевые отверстия на концах байпасной камеры. Определены

параметры, обеспечивающие наибольшее снижение объёмов эжекции за счет рециркуляции воздуха.

Устройство комбинированной камеры с транзитным обменом воздуха между верхним не аспирируемым укрытием и приемной камерой нижнего аспирируемого укрытия повышает энергосберегающий эффект. Расход нагнетаемого в аспирируемое укрытие эжектируемого воздуха Q_1 можно существенно уменьшить путем организации двойного циркулирования воздуха по внешнему кольцу (с использованием торцевых отверстий байпасной камеры) и по внутреннему кольцу, обеспечивающему перетекание воздуха через отверстия перфорации по всей длине желоба.

Так на конкретном примере при небольшой эжектирующей способности потока сыпучего материала ($Le = 0.6$), даже при одном внутреннем кольце рециркуляции, расход нагнетаемого воздуха был снижен в 1.35 раза по сравнению с перегрузкой этого же потока материала в желобе с непроницаемыми стенками и отсутствием байпасной камеры, а при двойном кольце рециркуляции - в 1.78 раза. А при больших числах эжекции эффект снижения расхода Q_1 ещё выше. Так при $Le = 3$ и одном внешнем кольце циркуляции этот же расход при том же сопоставлении (с $Q_{н0}$) был уменьшен в 1.72 раза, а с двумя кольцами - в 4.29 раза.

Для проверки результатов, полученных теоретическим путем, была разработана экспериментальная установка. При снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха. Экспериментально доказано, что явление рециркуляции воздуха способствует снижению расхода воздуха, вытесняемого из укрытия, а значит и объёма эжектируемого воздуха. Наиболее рациональным представляется соотношение диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы равное 2-2,5. В этом случае объём эжектируемого воздуха может быть снижен не менее чем на 40%. При комбинированном байпасировании расход эжектируемого воздуха может быть снижен 60-80% в зависимости от интенсивности перегрузки.

На примере телескопического погрузчика ПУ-700 показано, что байпасная камера обеспечивает развитие рециркуляции эжектируемого воздуха, что уменьшает расход воздуха, истекающего через неплотности нижнего укрытия приемной ёмкости, в атмосферу почти в 1,5 раза.

Отрывные течения исследовались на разработанной экспериментальной установке аспирационного укрытия со щелевой неплотностью проведены экспериментальные исследования.

Исследовалось влияние горизонтальных, вертикальных, двухгранных непроницаемых пластин (козырьков) на к.м.с. входа в щелевую неплотность.

Показано, что оборудование щелевой неплотности горизонтальным козырьком длиной 0,5-0,7 калибра и уголком высотой в 1 калибр и шириной 0,5 калибра на расстоянии до козырька в диапазоне 0,5-1 калибра позволяет снизить расход воздуха более 17%.

Для исследования отрыва потока на входе в круглые всасывающие каналы, экранированные кольцевыми экранами, разработана математическая модель и компьютерная программа на основе дискретных вихревых колец и экспериментальная установка.

Вычислительный и натурный эксперименты позволили установить размеры и расположение профиля, способствующего наибольшему сопротивлению входу во всасывающий канал за счет эффекта отрыва струи.

Согласование расчётных и экспериментальных значений скорости и коэффициента местного сопротивления позволяет сделать вывод об адекватности и достоверности разработанного метода численного моделирования отрыва потока на входе в щелевидные и круглые всасывающие каналы. Для круглых всасывающих отверстий предлагается устанавливать на расстоянии 0.4 его радиуса диск с центральным отверстием такого же диаметра, что и всасывающий канал, и шириной кольца, равной его радиусу.

Для исследования закрученных потоков разработана математическая модель, вычислительный алгоритм, компьютерная программа для исследования динамики полидисперсных пылевых аэрозолей при разных свойствах пылинок вблизи местных отсосов закрытого и открытого типов различных кинематических и геометрических параметров, в спектре всасывания которых содержатся вращающиеся цилиндры и (или) цилиндры-отсосы.

В результате вычислительных экспериментов показано, что при размещении цилиндра или цилиндра-отсоса внутри аспирационного укрытия состав частиц пыли не подчиняется нормально-логарифмическому закону распределения. При использовании цилиндра-отсоса в качестве аспирационного канала характерно

значительное смещение дисперсного состава частиц пыли к мелким фракциям.

Значительного снижения пылеуноса в аспирационную сеть, вплоть до полного осаждения пыли на конвейерную ленту, можно достичь использованием вращающегося ротора или цилиндра-отсоса. Его положение, размеры, скорость вращения выбираются с помощью разработанной программно-алгоритмической поддержки.

На основании метода дискретных вихревых многоугольных рамок разработана математическая модель и компьютерная программа для расчета поля скоростей, в спектре действия круглого всасывающего канала, экранированного кольцевой турбулентной струей, охватывающей вытяжное отверстие. Произведена серия вычислительных экспериментов, на основании которых выбраны наиболее оптимальные параметры экранированного отсоса: радиус внутреннего экранированного кольца 1,6 калибра, его ширина 0,2-0,4 калибра (калибр - радиус всасывающего канала), начальная скорость истекающей струи должна превышать скорость в 5-10 раз. В этом случае скорость подтекающего воздуха можно увеличить в десятки раз и повысить эффективность улавливания загрязняющих веществ при сохранении расхода перерабатываемого воздуха и затрат электроэнергии.

Проведены экспериментальные и численные исследования поля скоростей в устье и характерном вертикальном сечении приемной воронки корпуса крупного дробления, оборудованном местным вентиляционным отсосом. Математическая модель и компьютерная программа строятся с использованием численного метода решения сингулярных интегральных уравнений. Экспериментальные замеры величины скорости осуществлялись на разработанном экспериментальном стенде. Исследовалось влияние экрана, перекрывающего устье воронки, вертикального фартука и расположение всасывающего канала на распределение скоростей во всасывающем факеле местного вентиляционного отсоса. Исходя из численного и экспериментального исследования величин скорости в устье и сечении приемной воронки корпуса крупного дробления, можем заключить, что для эффективной организации местной вытяжной вентиляции необходимо: 1) установить экран перекрывающий устье воронки не менее чем на половину; 2) установить вертикальный фартук длиной не менее $1/3$ от высоты приемной воронки, опускающийся с конца экрана; 3) установить всасывающее отверстие сбоку на стенке приемной воронки в верхней ее части.

Исследованы отрывные и вихревые течения в спектрах вытяжных каналов. Определены очертания вихревых областей, динамика развития вихревой структуры течения, взаимодействия вытяжного факела и приточных струй. Исследовано поведение одиночных пылевых частиц и полидисперсной совокупности пылевых частиц в спектрах действия вытяжных каналов. Рассмотрены различные классы задач, конфигурации открытых и закрытых местных вентиляционных отсосов.

Развиты теоретические основы расчета местных отсосов аспирационных укрытий перегрузочных узлов сыпучих материалов – наиболее характерных и распространенных источников пылевыделения при переработке пылящих материалов. Теоретически показано, что при мгновенном пуске по желобу нагретого сыпучего материала рост эжекционного давления «жестко» связан с изменением расхода пересыпаемого материала, а изменение температуры из-за значительной «инертности» межкомпонентного теплообмена намного отстают от изменения количества перегружаемого материала. При плавном изменении расхода частиц в начале и в конце пересыпки материала наблюдаются повышенные («пиковые») давления по сравнению с установившимися величинами. Объясняется это наличием максимального значения эжекционного напора при определённой величине расхода материала. Всплески давления не проявляются, если расход материала не достигает этой величины.

Разработана математическая модель, вычислительный алгоритм и компьютерная программа для расчета отрывных течений на входе в круглые отсосы-раструбы и для исследования поведения пылевых частиц в спектре их действия. Определены характерные размеры вихревых областей на входе в круглый отсос-раструб. Получена аналитическая формула для расчета границы отрывной области на входе в длинный отсос-раструб. Профилирование раструбов по найденным очертаниям отрывной области позволит улучшить аэродинамические и акустические свойства местных вентиляционных отсосов. Построены предельные траектории пылевых частиц разных размеров в спектре действия круглого отсоса-раструба. Предложен критерий эффективности местного вентиляционного отсоса в виде коэффициента улавливания данной пылевой частицы, равного отношению объёмов аспирации отсоса с раструбом и без него.

Указанные результаты имеют мультидисциплинарный характер, относятся к аэродинамике, обеспыливающей вентиляции, экологии, охране труда, механике двухфазных сред, вычислительной аэрогидромеханике. Могут использоваться на промышленных

предприятиях горнорудной промышленности, строительной индустрии и других производств для эффективной локализации пылевыделений и снижения энергоёмкости систем аспирации укрытий за счет использования свойства отрывных, закрученных и рециркулируемом потоков.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08005 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. Boca Raton: CRC Press, 2014. 417 с.
2. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions. Boca Raton: CRC Press, 2015. 576 с.
3. Логачев К.И., Аверкова О.А., Толмачева Е.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Сообщение 1. Разработка математической модели и вычислительного алгоритма // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. №9-10. С. 56-64.
4. Логачев К.И., Аверкова О.А., Толмачева Е.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Сообщение 2. Исследование параметров отрывной области // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. №11. С.30-38.
5. Логачев К.И., Аверкова О.А., Толмачева Е.И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого местного вентиляционного отсоса-раструба. Сообщение 3. Динамика пылевых частиц // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. №12. С. 31-39.
6. Averkova O.A., Kryukov I.V., Plotnikov K.V., Tolmacheva E.I., Khodakov I.V. Modeling Separated Flows Using Stationary Discrete Vortices // Modern Applied Science. 2015. Т.9, №3. С. 291-298.
7. Logachev K.I., Logachev I.N., Averkova O.A., Uvarov V.A., Tolmacheva E.I. Modeling the behavior of dust particles in a suction unit // Proceedings of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models: ICVFM Nagoya (November 17 - 20, 2014, Nagoya, Japan). 6 с.
8. Аверкова О.А., Крюков И.В., Толмачева Е.И. Имитационное моделирование эжекции воздуха в круглой трубе с байпасной камерой // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 207-211.

9. Averkova, O.A., Logachev, K.I., Logachev, I.N., Canar, A.E. Coupled problems of localization of dust and gas // COUPLED PROBLEMS 2015 - Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (San Servolo, Venice, Italy, May 18 –20, 2015). С. 677-688.
10. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Uvarov V.A., Logachev A.K. Aerodynamic Properties of Particles in the Gravitational Flow of a Chuted Bulk Material // PARTICLES 2015 - Proceedings of the IV International Conference on Particle-based Methods – Fundamentals and Applications (Barcelona, Spain, 28-30 September 2015). С. 1016-1027.
11. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Uvarov V.A., Logachev A.K.. The aerodynamics of a jet of particles in a channel // PARTICLES 2015 - Proceedings of the IV International Conference on Particle-based Methods – Fundamentals and Applications (Barcelona, Spain, 28-30 September 2015). С. 969-980.
12. Logachev K.I., Khodakov I.V., Averkova O.A. Decreasing the Power Requirements of Ventilation Shelters Through Aerodynamic Screening of Slot Leakages // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Т.56, Вып. 2. С. 204-209.
13. Logachev K.I., Kryukov I.V., Averkova O.A. Simulation of Air Flows in Ventilation Shelters with Recirculation // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Т.56, Вып. 4. С. 428-434.
14. Логачев К.И., Ходаков И.В., Аверкова О.А. Снижение энергоемкости аспирационных укрытий за счет аэродинамического экранирования щелевых неплотностей // Новые огнеупоры. 2015. № 4. С. 56-61.
15. Логачев К.И., Крюков И.В., Аверкова О.А. Моделирование воздушных потоков в аспирационном укрытии с рециркуляцией // Новые огнеупоры. 2015. № 8. С. 57-62.
16. Логачев К.И., Пузанок А.И., Логачев А.К., Толмачева Е.И. Численное моделирование воздушно-струйных течений под действием приточно-вытяжного устройства // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). 2015. Т.16. Вып. 4. С. 476-485.
17. Логачев К.И., Плотников К.В. Исследование поля скоростей в спектре действия местного вентиляционного отсоса приемной воронки корпуса крупного дробления // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 50-56.
18. Averkova O.A., Logachev A.K., Uvarov V.A. Modeling dust particle dynamics in suction units with rotating cylinders // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т.10, Вып. 24. С. 44939-44947.
19. Averkova O.A., Kryukov I.V., Plotnikov K.V., Tolmacheva E.I., Khodakov I.V. Simulation Of Flow Separation At The Inlet Of A Projecting Flat Suction Channel // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. 7(3). С. 2488 -2497.

20. Averkova O.A., Logachev I.N., Logachev K.I. Aerodynamics of an unsteady particles flow in the chute // ECCOMAS 2016 – Proceedings of the VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, e-Book Full Papers. 2016. T.1. С. 554-567.
21. Ходаков И.В. Моделирование отрывного течения на входе в многоугольное всасывающее отверстие // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 11-15.
22. Ходаков И.В. Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 3. С. 6-12.
23. Крюков И.В., Уваров В.А., Логачев И.Н. Исследование процессов рециркуляции воздуха в перфорированном желобе с байпасной камерой, находящейся под избыточным давлением // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 7. С. 85-89.
24. Крюков И.В., Логачев И.Н., Уваров В.А. Исследование процессов минимизации объемов удаляемого воздуха при комбинированном использовании перфорированного желоба с цилиндрической байпасной камерой // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 108-112.
25. Плотников К.В., Логачев И.Н., Уваров В.А. Расчет количества эжектируемого воздуха при разгрузке думпкаров в приемную воронку корпуса крупного дробления // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 7. С. 78-84.
26. Логачев И.Н., Попов Е.Н. Вероятностно-статистический подход к описанию аэродинамического взаимодействия коллектива падающих частиц с воздухом // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 120-123.
27. Логачев И.Н., Попов Е.Н. Вероятностно-статистический подход к описанию аэродинамического взаимодействия коллектива падающих частиц с воздухом: случай полифракционного материала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 95-99.
28. Kireev V.M., Buryanov I.A., Minko V.A., Seminenko A.S., Goltsov A.B. Determination of the height of aspiration shelter funnel // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. T.8, Вып. №4. С. 22538-22544.
29. Goltsov A.B., Uvarov V.A., Podporinov B.F., Seminenko A.S., Alifanova A.I. Labyrinth style aspiration hood // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. T.8, Вып. №4. С. 24801-24807.

30. Logachev I.N., Minko V.A., Popov E.N. Determination of the aerodynamic drag of the incident particles of a multifractional material // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Т.8, Вып. №4. С. 22555-22566.
31. Logachev I.N., Logachev K.I., Uvarov V.A., Seminenko A.S., Goltsov A.B., Kireev V.M. Velocity field for fan weakly swirled jet of loading spouts for fine materials // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Т. 8. Вып. №4. С. 24880-24888.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ
МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ
БУФЕРНЫХ СЛОЕВ AlN И AlGAN НА СТРУКТУРНОЕ
СОвершенство ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СВЧ
ТРАНЗИСТОРОВ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА**

petrov@semitaq.ru

**Мамаев В.В.,
Новиков С.А.,
Петров С.И., канд. физ.-мат., наук,
ЗАО «Научное и технологическое оборудование»
Санкт-Петербург
Зайцев С.В., науч. сотр.,
Прохоренков Д.С., науч. сотр.
Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова**

Аннотация. На третьем этапе работы были поставлены цели по исследованию и оценке свойств гетероструктур AlN/AlGa_n/Ga_n методами рентгеновской дифракции, просвечивающей электронной микроскопии; дальнейшему снижению плотности дислокаций в буферных слоях AlN/AlGa_n; приборной апробации полученных результатов для создания СВЧ транзисторов и УФ фотокатодов. Показано, что использование высокотемпературных буферных слоев AlN/AlGa_n, выращенных на сильно рассогласованных подложках методом МЛЭ при использовании аммиака и экстремально высокой температуре (до 1150°C), позволяет кардинально улучшить структурное совершенство активных слоев. Представлены результаты выращивания слоев AlN с использованием сурфактанта Ga. В гетероструктурах с двумерным электронным газом, выращенных с использованием сурфактанта была достигнута подвижность носителей до 2000 см²/В·с. Получены транзисторы С диапазона с КПД 50% при удельной мощности 5Вт/мм на 4ГГц. Представлены результаты выращивания буферных слоев Al_xGa_{1-x}N с высоким содержанием Al (x=0,7) для УФ фотокатодов. Плотность дислокаций в слое Al_{0,7}Ga_{0,3}N, непосредственно прилегающем к активной области, составила (1–2)·10⁹ см⁻². Получены УФ фотокатоды, которые показали квантовую эффективность в режиме пропускания 14–16%.

Ключевые слова: нитридные гетероструктуры $aln/algan$, УФ фотокатоды, СВЧ транзисторы, плотность дислокаций.

Введение. Среди всего спектра материалов особый интерес представляют нитриды металлов третьей группы (III-N), так как они обладают уникальными свойствами и интенсивно исследуются с целью создания оптоэлектронных и СВЧ мощных высокотемпературных приборов на их основе. Особо отмечаются эффекты спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, которые приводят к повышению концентрации двумерного электронного газа, что делает их наиболее подходящими материалами для изготовления транзисторов с высокой подвижностью электронов, сочетающих в себе высокие рабочие частоты и высокие удельные мощности [1]. Прямоугольная структура энергетических зон позволяет проектировать и создавать оптоэлектронные приборы, работающие в широком спектральном диапазоне [2].

Одной из основных проблем при изготовлении приборов на основе III-нитридов является отсутствие недорогих согласованных по параметру решетки подложек. Выращивание на рассогласованных подложках приводит к высокой плотности дислокаций в GaN (10^9 – 10^{10} см⁻² для МЛЭ, 10^8 – 10^9 см⁻² для МОГФЭ), что усложняет задачу получения приборных гетероструктур [2].

Одним из важнейших применений III-N материалов является изготовление мощных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов в канале (HEMT) на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, обладающих рядом преимуществ по сравнению с аналогичными СВЧ транзисторами на основе традиционных полупроводников. Электрофизические параметры таких транзисторов сильно зависят от качества эпитаксиальных слоев, а, следовательно, зависят от конструкции буферных и барьерных слоев и условий их получения.

Другим важным применением нитридов металлов третьей группы является создание так называемых солнечно-слепых ультрафиолетовых фотоприемников на основе фотокатодов. Максимальная чувствительность фотоприемников должна обеспечиваться в спектральном диапазоне с длинами волн от 240 до 290 нм, поскольку излучение в коротковолновых диапазонах сильно поглощается атмосферой, а излучение с большими длинами волн занимает заметную часть спектра солнечной радиации [3]. Существенным достоинством приборов на основе соединений $p-Al_xGa_{1-x}N$ является возможность управления в них длинноволновой границы фоточувствительности в

пределах от 360 до 200 нм за счет изменения состава твердого раствора таких фотокатодов является сложной технологической задачей. Повышенная плотность дислокаций, возникающая вследствие рассогласования параметров решетки слоя и подложки, приводит к увеличению компенсации носителей заряда и, соответственно, уменьшению эффективности р-легирования. Таким образом, задача снижения плотности дислокаций в буферном слое между подложкой и активной областью является актуальной и для создания нитридных фотокатодов.

На данном этапе были поставлены следующие цели:

- Исследование и оценка свойств гетероструктур AlN/AlGa_N/Ga_N с использованием рентгеновской дифракции, просвечивающей электронной микроскопии.

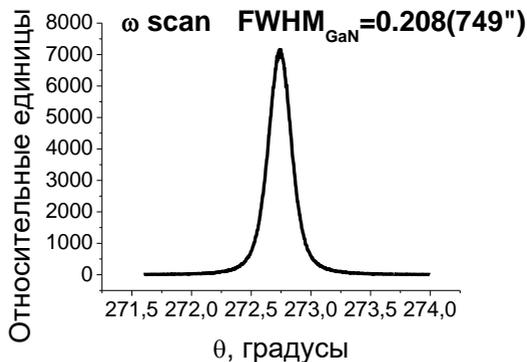
- Снижение плотности дислокаций до $(1-2) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ в слоях для солнечно слепых приемников (фотокатодов).

- Приборная апробация полученных ранее результатов

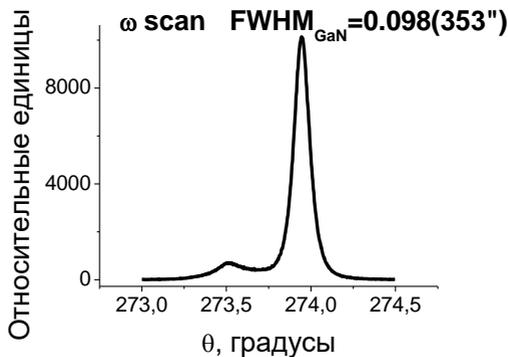
Многослойные гетероструктуры выращивались на подложках Al₂O₃ (0001) в Прикладной лаборатории ЗАО «НТО» на отечественных установках МЛЭ STE3N, разработанными и созданными в ЗАО «НТО» (SemiTEq). Уникальными особенностями данной установки является расширенный диапазон температур подложки и отношений V/III. В частности, благодаря криопанелям увеличенной площади и усиленной системе откачки в ростовой камере обеспечивается вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-7}$ аммиака 400 см³/мин. В результате дополнительной модернизации узла нагрева образца диапазон достижимых температур подложки был увеличен до 1200°C, что позволило заметно улучшить свойства слоев AlN и многослойных гетероструктур AlN/AlGa_N.

Концепция высокотемпературного буферного слоя.

Выращивание на начальной стадии роста слоев AlN толщиной более 200 нм при температуре 1150°C на подложке, а затем выращивание переходных областей AlGa_N, включая сверхрешетки, при температуре 900–920°C привело к улучшению свойств всей структуры. Улучшение кристаллического совершенства многослойной гетероструктуры подтверждается данными рентгеновской дифракции: значения полуширин пиков (0002) слоев AlN и Ga_N уменьшаются в 1,5-2 раза при увеличении температуры роста слоя AlN (рис. 1).



(a)



(б)

Рисунок 1 – Рентгеновская дифракция для слоев GaN толщиной 1 мкм, выращенных на тонком зародышевом слое AlN (а) и на “толстом” слое AlN (б).

При помощи сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM) получено изображение гетероструктуры, состоящей из слоев AlN, сверхрешетки AlN-AlGa_{0,3}N, GaN (рис. 2). Установлено, что плотность дислокаций находится на уровне (2– соответственно.

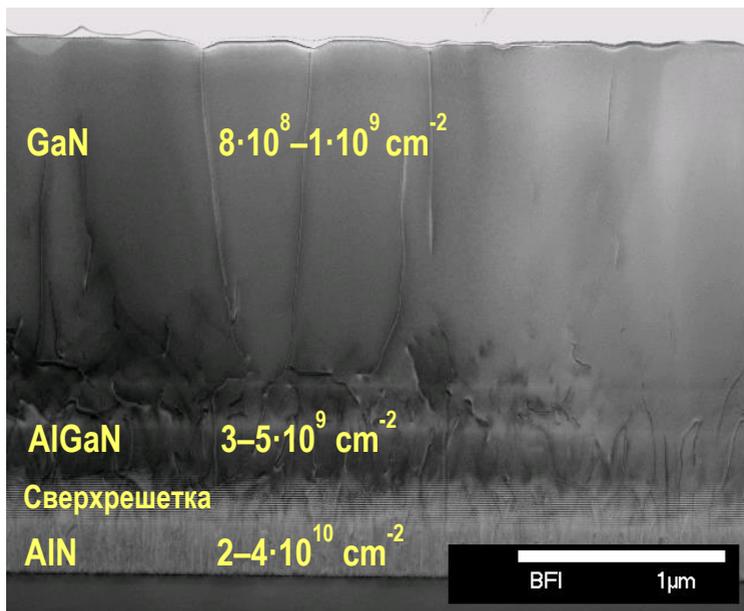


Рисунок 2 – Изображение скола многослойной гетероструктуры полученное с помощью STEM

Использование сурфактанта Ga для улучшения структурных свойств буферных слоев.

Было исследовано возможность использования сурфактанта Ga при выращивании буферного слоя AlN. Было проведено выращивание транзисторных гетероструктур с двумерным газом AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn, с различным потоком сурфактанта Ga во время роста слоя AlN при температуре подложки 1150 $^{\circ}\text{C}$.

При этом, можно заключить, что подвижность в двумерном электронном газе в гетероструктурах выращенных с использованием сурфактанта на 10–30% выше, чем в аналогичных структурах без сурфактанта, а оптимальное соотношение потоков Al:Ga находится в диапазоне от 15 до 5 (рис. 3). Максимальная подвижность в двумерном электронном газе 1800 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{с}$ при концентрации $1,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ была получена при соотношении потоков алюминия к галлию 10:1. При понижении концентрации в двумерном электронном газе до $1,0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ за счет понижения уровня легирования была получена подвижность до 2000 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{с}$.

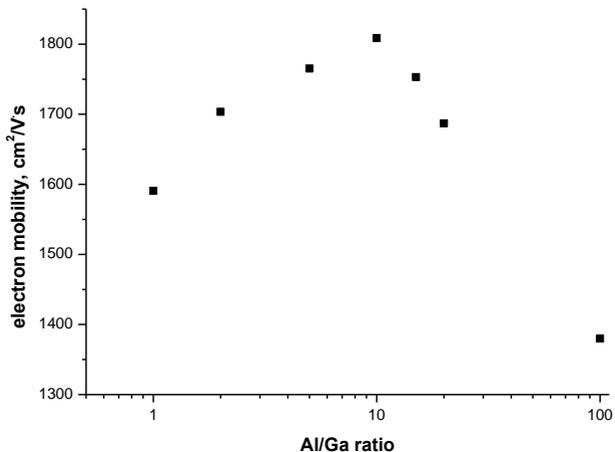


Рисунок 3 – Зависимость подвижности в двумерном газе GaN/AlGaN в гетероструктуре AlN/AlGaN/GaN/AlGaN от соотношения потоков алюминия и сурфактанта Ga в течении роста буферного слоя AlN (для наглядности точка без сурфактанта обозначена на рисунке как точка, соответствующая отношению потоков 100:1).

Применение, описанных выше, технологий и конструкций на подложках SiC, позволило создать полевые транзисторы, которые продемонстрировали статические параметры мирового уровня: ток сток-исток до 1–1,2 А/мм, крутизна 180–200 мС/мм, напряжение пробоя более 50 В, токи утечки менее 100 мкА при напряжении 50 В. Достигнуто КПД 50% при удельной мощности 5Вт/мм на 4ГГц. Транзисторы продемонстрировали долговременную стабильность параметров в течение более 3500 часов при температуре 85° С. Данные параметры получившихся устройств подтверждают высокое качество гетероструктур и правильность выбора конструкций и условий роста.

Рост структур с высоким содержанием Al для УФ фотокатодов.

Произведен рост буферных слоев AlN/AlGaN с содержанием Al 70% для солнечно слепых фотоприемников прозрачных в ультрафиолетовом диапазоне до 230 нм. Использование полученных ранее результатов (высокотемпературный буферный слой, сурфактант Ga) позволило снизить плотность дислокаций в данных конструкциях. По изображениям гетероструктур AlN/CP/Al_{0,7}Ga_{0,3}N полученным просвечивающей электронной микроскопией была оценена плотность

дислокаций в слое $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ (рис. 4), непосредственно прилегающем к активной области, которая составила $1-2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (рис. 4).

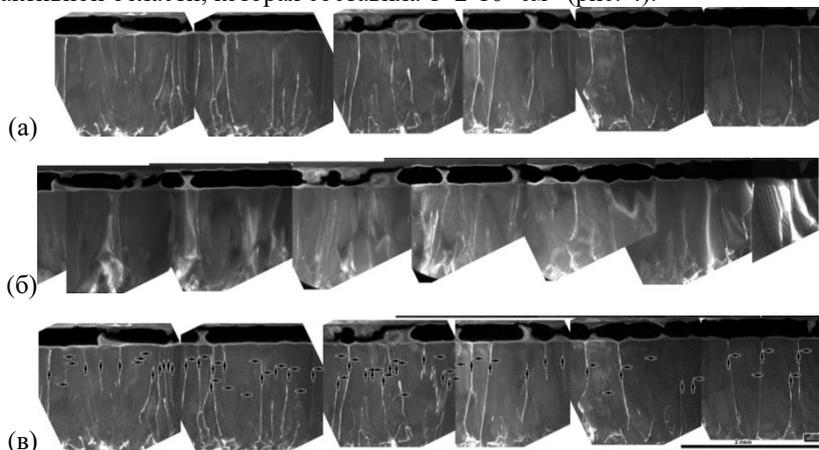


Рисунок 4 – ТЕМ изображения гетероструктуры $\text{AlN}/\text{CP}/\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ в двух взаимоперпендикулярных отражениях (а) - $g=(0002)$, (б) - $g=(-12-10)$ и (в) суперпозиция винтовых, краевых и смешанных дислокаций

Была проведена приборная апробация технологии низкодислокационных буферных слоев для получения нитридных фотокатодов. Активный слой p-GaN выращивался с помощью плазменного источника аммиака и легировался Mg . На рис. 5 представлены результаты измерений квантового выхода в режиме пропускания для конечных структур.

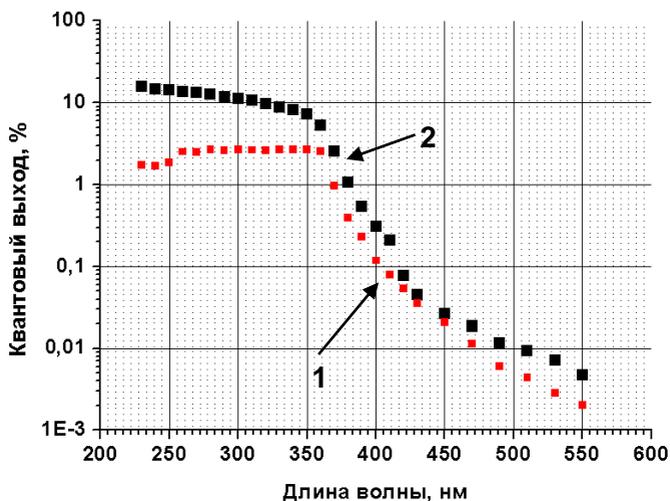


Рисунок 5 – Зависимость квантового выхода от длины волны фотокатода с активной областью р-GaN в режиме пропуска. 1-неоптимизированная структура с высокой плотностью дислокаций, 2- структура со сниженной плотностью дислокаций.

Снижение плотности дислокаций за счет оптимизации роста буферных слоев, а также оптимизация роста активного слоя позволила получить фотокатоды, которые показали квантовую эффективность в режиме пропуска на уровне 14–16%.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08048 «р_офи_м».

Список литературы:

1. M.S. Shur. Solid-State Electronics, 42 (12), 2131 (1998).
2. O. Ambacher. Growth and applications of Group III-nitrides. J. Phys. D: Appl. Phys., 31, 2653 (1998).
3. Айнбунд М.Р., Суриков И.Н., Чернова О.В., Чикунов. В.В. // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения. 2007. В.1. С.69-74.

**РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ АСПЕКТОВ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ ОРИГИНАЛЬНОГО
СИСТЕМНОГО ПОДХОДА "УЗЕЛ-ФУНКЦИЯ-ОБЪЕКТ"**

matorin@bsu.edu.ru

**Маторин С.И., д-р техн. наук,
Жихарев А.Г., канд. техн. наук,
Кондратенко А.А., аспирант
ЗАО «СофтКоннект»**

Аннотация. Представлены результаты исследования направленного на решение проблем, существующих в практике управления сложными промышленными объектами и технологическими процессами в условиях неполной информации о протекающих в них процессах. В процессе исследований по проекту показано, что в настоящее время отсутствует теоретический аппарат и методические основы анализа организационно-деловых и производственно-технологических процессов с учетом их системных характеристик (структурных, динамических и субстанциальных), а также формальные методы описания и обработки моделей этих процессов. Для решения данной задачи использованы оригинальные средства, разработанные авторами специально для моделирования слабо формализуемых предметных областей: - системный подход «Узел-Функция-Объект» (УФО-подход) как единый универсальный подход к исследованию явлений любой природы и, в том числе, к описанию знаний; - системно-объектный метод представления организационных знаний (СОМПЗ) как инструмент создания универсальных моделей знаний о любой предметной области. В результате выполнения проекта разработан алгоритм построения универсальной модели знаний для управления технологическими процессами на основе системно-объектной УФО-модели предметной области, а также формальный алгебраический аппарат для описания знаний о технологических процессах, представляющий собой исчисление функций УФО-элементов (по аналогии с исчислением процессов Милнера в варианте CCS), которое может рассматриваться как алгебра процессного подхода. Разработан новый метод построения онтологий на основе УФО-модлей и языка формального описания онтологий RDF (Resource Description

Framework). Разработан оригинальный метод имитационного представления знаний о технологических процессах, использующий СОМПЗ и алгебраический аппарат исчисления объектов Абади-Кардели, а также исследовательский прототип инструментария имитационного моделирования «UFOModeler».

Ключевые слова: Системный подход «Узел-Функция-Объект», системно-объектный метод представления знаний, исчисление функций, алгебра процессного подхода, онтология, имитационное моделирование, технологический процесс.

Неполнота и большое разнообразие информации о протекающих в сложных промышленных объектах технологических процессах создают практическую проблему управления этими процессами. При этом автоматизация сложных процессов, для которых не существует четких алгоритмов исполнения, практически не возможна за счет использования только формальных математических средств. Эффективное управление сложными технологическими процессами может быть достигнуто путем его интеллектуализации, т.е. путем создания и использования для управления процессами методов представления знаний об этих процессах. Это делает актуальным решение фундаментальной проблемы представление знаний в компьютерных системах для эффективного интеллектуального управления сложными технологическими процессами.

Для решения названной проблемы были поставлены и сформулированы следующие задачи:

– Создание универсального метода представления знаний в компьютерных информационных системах, обеспечивающего единый универсальный подход к системам различной природы.

– Совершенствование средств концептуального и формального описания знаний для управления технологическими процессами и робототехническими системами и механизма вывода на моделях знаний, которые позволят генерировать новые знания на основе существующих.

– Разработка основных положений универсального метода представления знаний для управления технологическими процессами в терминах формализованного графоаналитического подхода «Узел-Функция-Объект»

Данные задачи определили следующие направления исследований:

- Обеспечение формализации графоаналитических средств процессного подхода, рассматриваемых, в настоящее время, как один из способов представления знаний об организационно-деловых и производственно-технологических процессах.

- Расширение возможностей универсального способа представления знаний любой природы в виде онтологий.

- Совершенствование возможностей имитационного моделирования, в том числе, технологических процессов.

При этом в основе подхода к исследованиям по все трем направлениям лежит системно-объектный подход «Узел-Функция-Объект» [<http://ru.wikipedia.org/wiki/Узел-Функция-Объект>].

I. В процессе адаптации алгебраических аппаратов теории паттернов Гренандера, исчисления процессов Милнера (в варианте CCS) и исчисления объектов Абади-Кардели к задаче описания знаний для управления технологическими процессами и робототехническими системами разработан формальный алгебраический аппарат для описания знаний о технологических процессах. Определены и описаны алгебраические операции на функциях элементов «Узел – Функция – Объект» (как элементы **исчисления функций**) по аналогии с операциями на процессах в исчислении процессов (CCS) [1].

Рассмотрены и обоснованы их некоторые полезные для формального представления знаний о технологических процессах свойства. Кроме того, введено понятие нулевого (пустого) процесса. Разработана методика трансформации визуальных графических диаграмм процессов, в том числе технологических, в алгебраические выражения.

Далее формализованы процедуры декомпозиции и агрегации элементов (как с линейным порядком соединения, так и с порядком соединения«дерево») системных графоаналитических моделей процессов за счет использования операций исчисления функций, т.е. после преобразования визуальных диаграмм в алгебраические выражения. Формально определены условия агрегации элементов «Узел – Функция – Объект», в соответствии с которыми УФО-элементы агрегируются в соответствии с правилами выполнения операции «присоединения» алгебры изображений в теории паттернов.

Например, при следующих условиях агрегирования: $\mathbb{I}_{k1} = \mathbb{I}_{k1}^?$, $\beta_{k1}^! \subseteq \beta_{k1}^?$; $\mathbb{I}_{k2} = \mathbb{I}_{k2}^?$, $\beta_{k2}^! \subseteq \beta_{k2}^?$; $\mathbb{I}_i = \mathbb{I}_{k2}^?$, $\beta_i^! \subseteq \beta_{k2}^?$, диаграмма на рисунке 1 может быть представлена в виде выражения: $\mathbf{p}^{ORM_{kik}} = \mathbf{p}^{OR_{k.}}(\mathbf{p}_i^0 + \mathbf{p}^{OM_k}) \cup \mathbf{p}^{OM_{k.}}(\mathbf{p}_i^0 + \mathbf{p}^{OR_k}) = \mathbf{p}^{OR_{k.}}\mathbf{p}_i^0 \cup \mathbf{p}^{OR_{k.}}\mathbf{p}^{OM_k} \cup \mathbf{p}^{OM_{k.}}\mathbf{p}_i^0$.

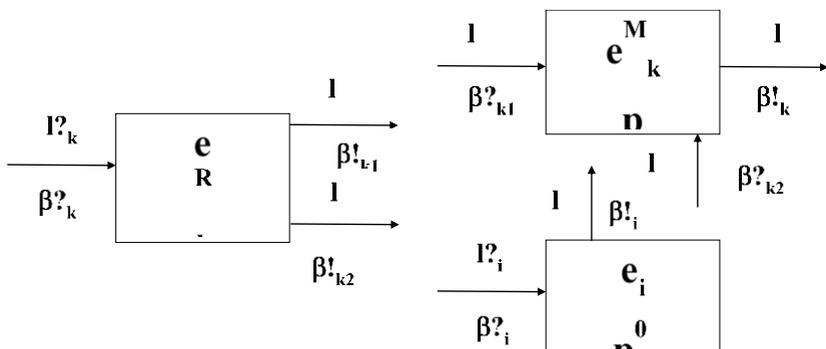


Рисунок 1 – Пример процессной диаграммы

Кроме того, предложены методика и алгоритм минимизации графоаналитических УФО-моделей процессов путем анализа их алгебраического описания. Далее разработаны методика и алгоритм трансформации графического и формализованного описания УФО-диаграмм процессов, в том числе технологических, в выражения на языке исполнения бизнес-процессов (XPDL) [2].

II. Завершено создание нового метода представления знаний о технологических процессах, использующего метод построения онтологии на основе системно-объектной УФО-модели. В общем виде последовательность действий, составляющих предложенный метод построения онтологий, выглядит следующим образом [3, 4]:

1. Моделирование предметной области с использованием средств УФО-подхода (построение УФО-модели).

2. Извлечение из УФО-модели фактов о предметной области.

3. Представление полученных фактов на языках наподобие RDF, OWL.

4. Валидация (оценка) полученного формального представления онтологии.

5. Использование онтологии предметной области для решения прикладных задач (в том числе в информационных системах) и её актуализация путем модификации лежащей в её основе УФО-модели.

По сравнению с известными подходами и методами разработки онтологий предложенный метод обладает рядом преимуществ. Так, в отличие от методологии Ушолда и Кинга, он в полной мере

соответствует жизненному циклу онтологии и подразумевает формализованную технику отбора концептов, включаемых в онтологию. Предложенный метод является независимым от приложения, так как в основе онтологии лежит универсальная системно-объектная модель, всесторонне характеризующая предметную область, что отличает его от методологии Грюнингера и Фокса. Цикличность процесса доработки онтологии, по сравнению с положениями методологии On-To-Knowledge, не порождает проблемы выбора условия останова, так как процесс изменения результата инициируется только при изменении исходной УФО-модели. В сравнении с подходом SENSUS, использование системно-объектных моделей в качестве основы для разработки онтологий обеспечивает сокращение доли непосредственного участия экспертов на первоначальных этапах подготовки онтологии. Соответственно, это позволяет снизить субъективность принимаемых решений и обеспечить прогнозируемость времени, необходимого на создание онтологии (в отличие от подхода Diligent). Разработанный метод поддерживает принцип расширяемости полученной онтологии, что является преимуществом относительно существующих методов разработки онтологий на основе извлечения знаний из текстов. Таким образом, предложенное решение позволяет усовершенствовать средства создания онтологий для использования в задачах представления и управления знаниями организаций и предприятий.

Особое внимание при построении онтологии по предложенному методу уделяется валидации результата. В работе рассмотрено понятие валидации онтологии и основные задачи данного процесса. Разработан ряд правил, которым должна соответствовать корректная онтология, построенная на основе УФО-модели предметной области. Для формальной записи указанных правил используется специализированный язык SWRL (Semantic Web Rule Language), позволяющий разрабатывать и включать правила вывода непосредственно в код онтологии. Для обеспечения простоты восприятия человеком используется нотация языка SWRL Human Readable Syntax, согласно которой правило представляется в виде «Антецедент→Консеквент». В антецеденте (теле) и консеквенте (следствии) SWRL-правила могут участвовать наименования свойств (предикатов), входящих в онтологию, а также переменные в виде идентификатора с предшествующим знаком вопроса. Разработан перечень правил валидации онтологии в нотации Human Readable Syntax языка SWRL.

В качестве развития метода построения онтологии на основе системно-объектной УФО-модели разработаны метод и алгоритм логического вывода на системно-объектной модели за счет использования построенной на данной модели онтологии [5].

Предложенный метод построения онтологий на основе системно-объектных моделей предметной области открывает возможности применения ряда средств и инструментов обработки онтологий к лежащим в их основе УФО-моделям. В частности, это относится к решению задач логического вывода знаний. Основные задачи логического вывода на УФО-моделях, которые могут быть решены при помощи средств обработки онтологий, можно систематизировать следующим образом.

1. Задачи на основе данных о связях:
 - 1.1. построение классификации связей;
 - 1.2. вывод перечня подклассов заданного класса связей;
 - 1.3. получение полной информации о заданном классе связей.
2. Задачи на основе данных об узлах:
 - 2.1. получение подробной информации о заданном узле;
 - 2.2. определение функции, балансирующей заданный узел;
 - 2.3. получение информации об объекте, занимающем данный узел;
 - 2.4. вывод перечня портов (всех, входящих, исходящих) заданного узла;
 - 2.5. определение узлов, имеющих сходные порты с заданным;
 - 2.6. формирование перечня пустых/занятых портов заданного узла.
3. Задачи на основе данных о функциях:
 - 3.1. вывод подробной информации о заданной функции;
 - 3.2. построение списка узлов, балансируемых заданной функцией;
 - 3.3. получение списка объектов, реализующих заданную функцию;
4. Задачи на основе данных об объектах:
 - 4.1. отображение подробной информации о заданном объекте;
 - 4.2. вывод списка узлов, занимаемых заданным объектом;
 - 4.3. получение функций, реализуемых конкретным объектом;
5. Задачи на основе данных об УФО-элементах в целом:
 - 5.1. формирование перечня входов и выходов заданной функции (на основе данных об узле, его портах и балансирующей его функции);
 - 5.2. получение информации о связях между двумя заданными УФО-элементами (на основе информации об узлах, их портах и существующих в модели связях);

5.3. построение цепочек взаимодействия между заданными УФО-элементами (на основе данных об узлах, их портах, существующих в модели связях).

Полученные в ходе исследования результаты интеграции средств формализации УФО-подхода и формальных языков описания онтологий позволяют решать указанные задачи средствами и инструментами логического вывода на онтологиях. Разработан соответствующий метод, составляющими которого являются:

- извлечение знаний о предметной области из компьютерной графоаналитической системно-объектной модели;
- представление извлеченных знаний на формальном языке записи онтологий, то есть в виде, пригодном для машинной обработки;
- применение инструментов логического вывода (языка запросов или решателя) к полученному формальному представлению онтологии, построенной на основе УФО-модели.

На основе данного метода предложен алгоритм логического вывода на УФО-моделях (см. рис. 2).

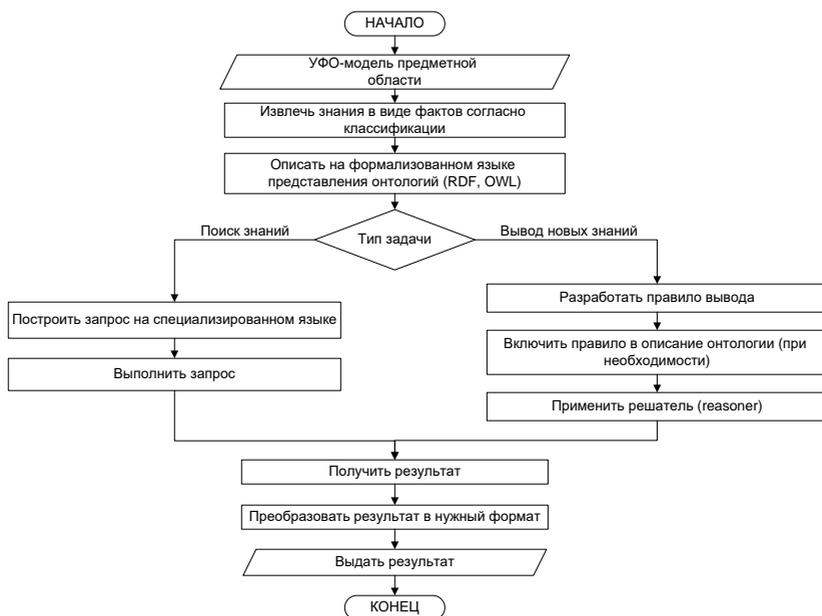


Рисунок 2 – Алгоритм логического вывода на УФО-моделях

Обзор существующего инструментария в области логического вывода на онтологиях показал, что для прикладных целей, как правило, требуется либо модификация существующих средств, либо разработка новых, специализированных для решения поставленных задач. При этом применение средств логического вывода на онтологиях к УФО-моделям (фактически – к их представлению на языках описания онтологий) имеет ряд преимуществ, к которым относятся гибкость и масштабируемость получаемого решения, а также применимость для решения сложных задач анализа моделей предметных областей.

Формальное представление онтологии, построенной на основе УФО-модели, может быть использовано для решения прикладных задач, в частности, для логического вывода при управлении знаниями. В результате исследования установлено, что существующие средства решения задач логического вывода на онтологиях могут успешно применяться для решения специализированных задач построения новых знаний на основе онтологий, разработанных на базе УФО-моделей согласно предложенному методу. В частности, для решения простых задач поиска необходимых знаний применяется язык запросов к онтологиям SPARQL. В целях вывода новых знаний на основе уже имеющихся в онтологиях фактов, а также включения результатов такого вывода непосредственно в формальное описание онтологии, используется язык SWRL, который также применяется в целях валидации онтологий. Рассмотрены примеры решения задач вывода знаний на онтологиях, построенных на базе УФО-моделей, с помощью SWRL-правил.

Для автоматизации использования метода построения онтологии на основе системно-объектной УФО-модели разработаны примеры специализированного RDF-словаря для моделирования знаний с целью управления технологическими процессами.

Поскольку в качестве средства формализации записи фактов о классификации связей используются нотации языка RDF, все факты будут представлены в виде триплетов. При формировании таких RDF-триплетов зачастую в качестве предикатов выступают типовые действия и обозначения отношений, которые многократно встречаются в различных предметных областях. В целях унификации записи данных, представленных с помощью RDF, а также упрощения их восприятия, подобные предикаты включают в состав так называемых словарей RDF. Примерами наиболее развитых подобных словарей, содержащих наиболее общие, междисциплинарные термины (предикаты), могут считаться RDFS, DublinCore, schema.org. Для отдельных сфер

деятельности и профессиональных областей также разрабатываются специализированные словари метаданных и спецификации.

Как правило, предикаты, соответствующие основным возможным видам отношений между объектом и субъектом, необходимые для записи извлеченных из УФО-модели фактов, уже включены в существующие базовые словари RDF. Однако, поскольку факты, отражающие отношения между составляющими УФО-элементов и самими УФО-элементами, достаточно специфичны, многие из соответствующих предикатов отсутствуют в наиболее развитых и общепринятых словарях метаданных и спецификациях. Поэтому возникает необходимость создания собственного специализированного словаря, в который войдут конструкции (предикаты), предназначенные для описания отношений в рамках предметной области с точки зрения УФО-анализа.

В целях систематизации и формализации набора знаний о предметной области, содержащихся в УФО-модели, на предыдущем этапе выполнения проекта сформулирована классификация соответствующих фактов – триплетов, характеризующих единицу сведений о предметной области. Для каждой группы фактов, входящей в разработанную классификацию, приведено подробное формальное обоснование, позволяющее формализовать извлечение соответствующих фактов из УФО-моделей и осуществить их дальнейшее преобразование в целях представления на языке RDF.

В результате сформирован специализированный RDF-словарь, необходимый для записи извлеченных из УФО-модели фактов на формализованном языке представления онтологий RDF. Введенные специальные предикаты, отсутствующие в общепринятых RDF-словарях, представлены как свойства новых классов, вводимых в RDF-описание онтологии средствами расширения языка RDF – RDFS. Данные классы позволяют описывать в онтологии основные понятия и сущности УФО-подхода, такие как УФО-элемент, Узел, Функция, Объект, связь, классификация связей.

Полученные результаты позволяют обеспечить возможность алгоритмизации и автоматизации отдельных составляющих предлагаемого метода построения онтологий.

Разработан и апробирован исследовательский прототип инструментария системно-объектного моделирования онтологических знаний.

Принцип работы программного пакета состоит в следующем. В качестве исходного файла принимается XML-файл УФО-модели,

полученный с помощью программного средства UFO-toolkit. Для осуществления его преобразования в конструкции языка RDF, описывающие онтологию предметной области, в общем случае необходимо выполнить следующие шаги.

1. Выделить в исходном файле концепты предметной области в соответствии со следующими типами:

- UFO-элементы (узлы);
- функции UFO-элементов;
- классы связей;
- связи, присутствующие в модели;
- порты узлов.

2. Определить все значимые атрибуты (характеристики) выявленных концептов (идентификаторы, наименования, описания, специфические свойства).

3. Установить взаимосвязи между выявленными концептами согласно классификации извлекаемых из UFO-модели фактов.

4. Сформировать результирующий файл в следующей последовательности:

– Добавить общие заголовки для корректной интерпретации языка RDF.

– Сформировать блок информации о классификации связей.

– Включить в файл фрагмент, описывающий иерархию общих предикатов (понятий), касающихся характеристик портов узла.

– Добавить конструкции, характеризующие каждый UFO-узел, его атрибуты, факты группы I классификации, где узел выступает в качестве объекта триплета, а также факты группы II классификации, касающиеся наличия у узла портов.

– Добавить конструкции, характеризующие каждую UFO-функцию, её атрибуты и факты групп Iи I(inv) классификации, где функция выступает в качестве объекта триплета.

– Добавить конструкции, характеризующие каждый UFO-объект, его атрибуты (т.е. факты группы IV классификации) и факты группы I(inv) классификации, где UFO-объект выступает в качестве объекта триплета.

– Сформировать блок информации о существующих в модели связях между UFO-узлами (факты группы V и V(inv) классификации).

Одним из основных преимуществ процедуры построения RDF-кода – базиса онтологии на основе XML-представления UFO-модели – является возможность автоматизации данного процесса. Этапы

алгоритма такого преобразования могут быть реализованы в качестве основного функционала программного средства. Рассмотрим особенности программной реализации указанного алгоритма.

Программное средство реализовано с учетом принципов объектно-ориентированного программирования. Для преобразования исходного XML-файла UFO-модели, полученного с помощью редактора UFO-Toolkit, в файл онтологии, представленной на языке RDF в нотации RDF/XML, используется промежуточный шаг – сохранение извлеченных из модели данных в виде объектов соответствующих классов. Основными классами в данном случае должны являться классы, соответствующие объекту, функции и узлу как составляющим UFO-элемента. Причем экземпляр класса «Объект» можно считать свойством класса «Функция», а экземпляр класса «Функция», в свою очередь, свойством класса «Узел».

Программное средство (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016613633 от 01 апреля 2016 г.) адаптировано и апробировано на примере решения задач управления знаниями в компании-разработчике программного обеспечения для представления знаний о технологическом процессе настройки сложной информационной системы. Внедрение показало положительный эффект предложенных методов и средств, в частности, позволило снизить нагрузку на сотрудников предприятия, сократить время поиска и формирования новых знаний, систематизировать имеющиеся знания и организовать общий доступ к ним.

III. Разработан оригинальный имитационный метод представления знаний о технологических процессах, использующий системно-объектный метод представления знаний и алгебраический аппарат исчисления объектов Абади-Кардели [6].

Метод имитационного моделирования технологических процессов на их системно-объектной графоаналитической модели основан на предложенном авторами ранее Системно-Объектном Методе Представления Знаний (СОМПЗ), представляющем собой формализацию системно-объектных графоаналитических UFO-моделей алгебраическими средствами исчисления объектов Абади-Кардели. Как было показано на первом этапе проекта элементы графоаналитической UFO-модели (UFO-элементы и связи между ними) могут быть формально описаны в виде специальных объектов упомянутого выше исчисления объектов - «узлового/функционального объекта» и «потокowego объекта». Первый объект описывает структурную

(интерфейсную), процессную (динамическую) и субстанциальную характеристику участника моделируемого процесса, а второй объект - элементы, которыми обмениваются данные участники. Процедура имитационного моделирования в данном случае представляет собой процесс передачи потоковых объектов между объектами функциональными, что и учтено в разработанном алгоритме. Согласно УФО-подхода, перед разработкой модели системы, определяется иерархия потоковых объектов, которые в дальнейшем будут использоваться в модели. При этом необходимо указать свойства потоковых объектов, которые будут исследоваться в процессе имитации функционирования моделируемой системы. После описания иерархии потоковых объектов, создается модель системы, представляющая собой набор УФО-элементов, которые соединяются потоковыми объектами, т.е. создается спецификация моделируемого процесса. После чего, для каждого УФО-элемента определяется его функция, т.е. описывается как его входящие потоки преобразуются в выходящие. Процесс имитационного моделирования на основе системно-объектной модели знаний и ее формализации средствами исчисления объектов состоит из следующих этапов [7]:

1) создание иерархии связей, т.е. потоковых объектов системно-объектной модели, у которых определяются, важные для данной предметной области, параметры;

2) создание визуальной УФО-модели обработки потоковых объектов, на которой отображаются все узлы, ветвления и т.п.;

3) описание узловых объектов с их параметрами и методами алгебраическими средствами исчисления объектов; при необходимости метод узлового объекта декомпозируется на подпроцессы нижнего уровня;

4) использование полученной модели путем инициализации начальных значений модели и запуске механизма логического вывода, в результате которого формируется модель поведения системы для текущего конкретного случая.

Данная методика позволяет в удобном визуальном виде автоматически получать цепочки процессов для различных конкретных ситуаций. Используя такую модель, пользователь не только может обеспечить автоматизированную поддержку принятия решений по управлению процессами, но также накапливать и хранить опыт в виде удачных решений и использовать его в дальнейшем. Для описания методов узловых/функциональных объектов (т.е. функций УФО-

элементов) разработан язык описания функциональных узлов «УФО-скрипт», синтаксически подобного языку программирования Pascal.

Доработан исследовательский прототип инструментария имитационного моделирования для решения задачи представления знаний о технологических процессах.

В результате выполнения проекта создана новая версия программного инструментария системно-объектного моделирования, реализующая описанную выше методику имитационного моделирования («UFOModeler», <http://ufomodeler.ru>, Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015663240 от 14.12.2015.). Программный пакет позволяет создавать иерархии потоковых объектов, конфигурации узлов и соединяющие их потоки с помощью редактора УФО-диаграмм, а также задавать функции каждому узлу. После задания функции УФО-элемента, ее можно описать с помощью УФО-диаграммы более нижнего уровня, если имеет место сложная процедура преобразования входных потоковых объектов в выходные, иначе имеется возможность описать работу функции с помощью языка УФО-скрипт. Функция УФО-элемента описывается скриптом в том случае, если достигнут необходимый уровень декомпозиции (зависит от целей моделирования) и функция УФО-элемента представляет собою набор достаточно простых команд. Для использования созданной имитационной модели системы, необходимо задать начальные параметры модели. Эти параметры определяются входными потоковыми объектами контекстной модели системы. После задания начальных параметров, модель запускается на исполнение. При запуске имитации, построенная модель транслируется в программу, которая выполняется по следующей схеме: исполняется функция того узла, потоковые объекты которого имеют конкретные значения своих параметров. Для имитации функционирования процесса в инструменте UFOModeler есть отдельный модуль, который позволяет запустить модель, настроить параметры модели, приостановить работу модели, визуализировать результаты имитационного моделирования [8].

В качестве примера работы созданного программного инструментария далее на рисунках 3-7 представлены диаграммы имитационной модели двигателя внутреннего сгорания продемонстрированные на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка» (НИ-TECH-2017) в Санкт-Петербурге. На данном конкурсе UFOModeler удостоен серебряной медали.

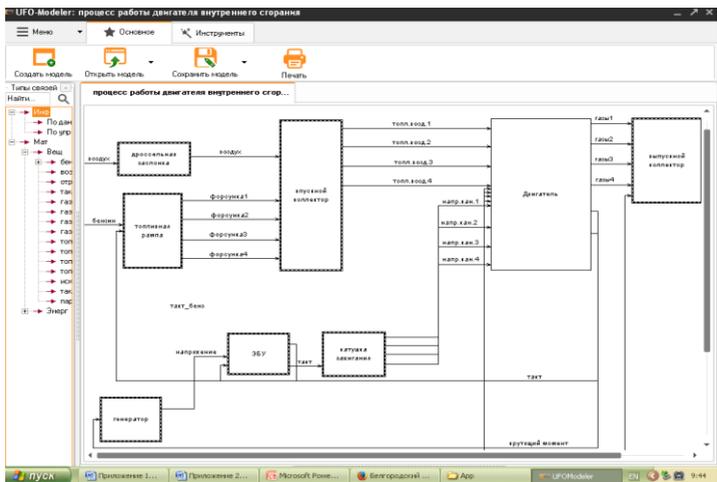


Рисунок 3 – Графическая модель работы двигателя внутреннего сгорания (общий вид)

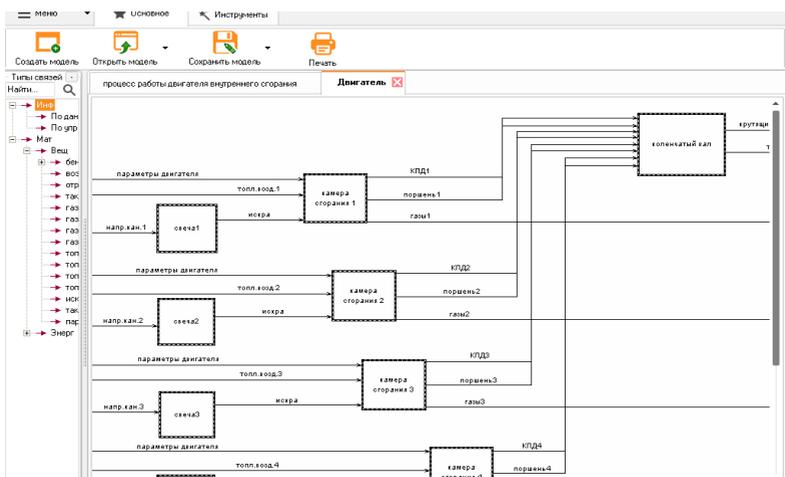


Рисунок 4 – Графическая модель работы двигателя внутреннего сгорания (блок цилиндров)

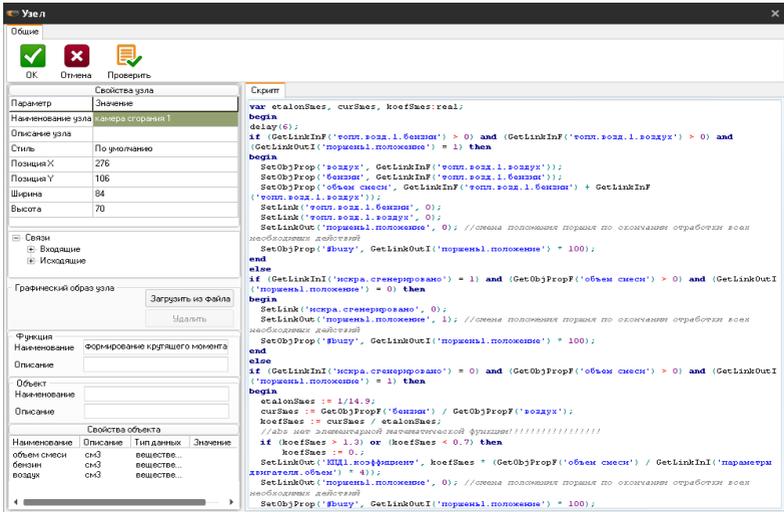


Рисунок 5 – Описание на языке UFO-скрипт работы камеры сгорания

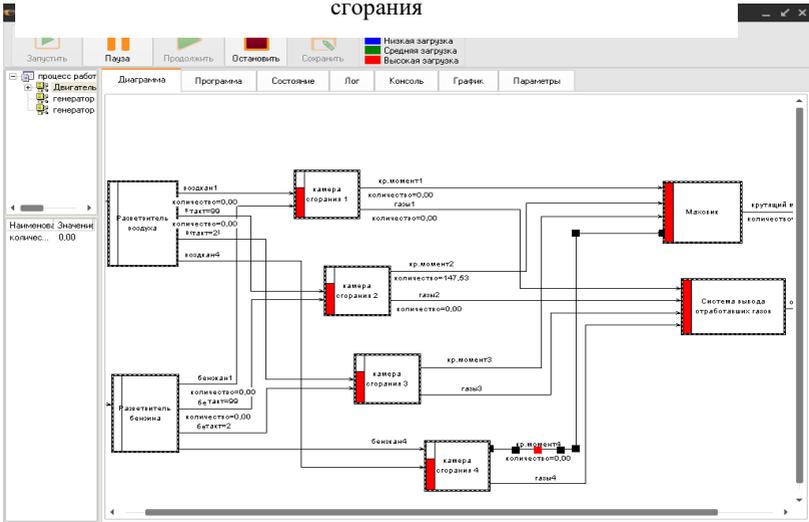


Рисунок 6 – Имитатор работы двигателя внутреннего сгорания

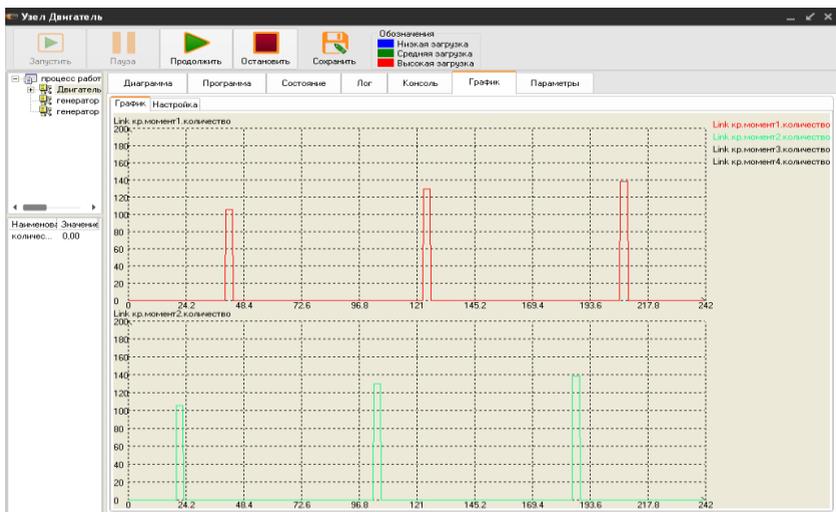


Рисунок 7 – Работа модуля графического анализа

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-47-08003 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Зимовец О.А., Маторин С.И. Системное графоаналитическое моделирование административных процедур. Белгород: Изд-во ООО ГиК, 2014. 134 с.
2. Маторин С.И., Зимовец О.А. Алгебраический аппарат процессного подхода для автоматизации исполнения деловых процедур // Труды 6-й Международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2015 (15-20 июня, г. Светлогорск, Россия). Т.2. М.: С.85-91.
3. Кондратенко А.А., Маторин С.И. Построение онтологий на основе моделей «Узел-Функция-Объект» // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. №1. С. 47-56.
4. Слободюк А.А., Маторин С.И. О возможности извлечения фактов из УФО-моделей и представлении их с помощью RDF // Труды XVIII Российской научной конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями» ИП&УЗ – 2015 (21-24 апреля, г. Москва, МЭСИ, Россия). Т.1. М.: С.482-488.

5. Кондратенко А.А., Маторин С.И. Логический вывод на визуальных графоаналитических УФО-моделях путем интеграции со средствами онтологического инжиниринга // Научные ведомости БелГУ. Серия Экономика. Информатика. 2016. №9 (230), Выпуск 38. С. 156-164.
6. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зайцева Н.О. Имитационное моделирование с использованием системно-объектного подхода. // Прикладная информатика. 2015. №6(60). Выпуск 10. С. 91-104.
7. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. Системно-объектный инструментарий для имитационного моделирования технологических процессов и транспортных потоков // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015. №4. С. 95-103.
8. Жихарев А.Г., Маторин С.И. Системное имитационное моделирование с использованием исчисления объектов // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015): (21-23 окт. 2015 г., Москва). Т. 1. М.: ИПУ РАН. С.220-224.

ВЛИЯНИЕ ПОДСЛОЯ НА СТРУКТУРУ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ОСАЖДЕННОГО МАГНЕТРОННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

nvm84@ya.ru

Нарцев В.М., канд. техн. наук,
Зайцев С.В., науч. сотр.,
Прохоренков Д.С., инженер-исследователь,
Ващилин В.С., канд. биол. наук,
Евтушенко Е.И., д-р техн. наук, проф.,
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В работе представлены морфологические и рентгеноструктурные свойства тонких пленок нитрида алюминия, сформированных методом реактивного магнетронного распыления, на подложку из лейкосапфира, в две стадии нанесения. Рассмотрены процессы роста зерен в покрытии, и формирование краевых дислокаций. Вычислена толщина покрытия, параметр ячейки a , средний размер зерен, для различных образцов сформированных покрытий.

Ключевые слова: нитрид алюминия, магнетронное распыление, дислокация, вюрцит.

В настоящее время особо важное значение приобретает разработка недорогой низкодефектной нитридной микроэлектроники, в частности, темплейтов нитрида алюминия (AlN) на сапфире [1]. Среди способов синтеза алюминитридных слоев наиболее интересным сегодня является магнетронное напыление из-за возможности управлять процессом формирования структуры покрытия через регулирование массовых и энергетических потоков на подложку [2, 3]. В данной работе изучалось влияние условий магнетронного синтеза на стадиях зарождения и роста алюминитридных покрытий на сапфире с целью поиска тенденций формирования эпитаксиальных слоев.

Материалы и методы. Пленки AlN были нанесены на подложки из лейкосапфира с помощью вакуумной установки QUADRA 500TM, методом дуального магнетронного распыления с несбалансированной магнетронной системой. Перед синтезом покрытий подложки подвергались ультразвуковой очистке в ацетоне, а затем промывались деионизованной водой и сушились в потоке сухого азота.

Вакуумную камеру откачивали до давления ниже 5×10^{-3} Па, скорость откачки составляло 1028 л/мин. Перед нанесением покрытия производилась ионная очистка поверхности образцов в среде аргона при напряжении 2000 В, давлении $6,5 \times 10^{-2}$ Па, время очистки составляло 10 мин. Покрытия наносились из двух вертикально установленных мишени (катода) путем распыления алюминия чистотой 99,999% в газовой среде аргона и азота при давлении 0,22 Па. Объемная доля реактивного газа N_2 составляло 20-30 об.%. Расстояние от подложек до магнетрона и ионного источника было одинаковое, составляло 70 мм. Подложки во время нанесения покрытия дополнительно не подогревались.

Для оценки влияния структуры зародышевого слоя на морфологию покрытий было произведено осаждение при различных комбинациях токов разряда на первой и второй стадиях, длительность которых составляла 5 и 115 мин соответственно. В табл. 1 приведены условия двухстадийного процесса осаждения пленок нитрида алюминия.

Таблица 1 – Условия двухстадийного процесса осаждения покрытий AlN

Код	Разрядный ток, А	Доля N_2 в плазме, об. %
	*	
NG4		0

* – параметр на первой стадии / параметр на второй стадии

Кристаллическая структура тонких пленок AlN исследовалась с помощью рентгеновской дифракции ARL X'TRA (ThermoTechno) в диапазоне брегговских углов 2θ от 30° до 80° . Режим сканирования θ -scan. Для идентификации фаз использовалась картотека JCPDF. Морфология поверхности, фрактограммы и толщина пленки измерялись с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения MIRA 3 LMU (TESCAN).

Результаты и обсуждения. Согласно данным рентгеновской дифракции (рис. 1) все покрытия относятся к кристаллическому AlN с вюрцитовой структурой. При этом пик дифракции от плоскости (103), полученный в режиме θ -scan, происходит от зерен AlN, плоскости (002) которых практически параллельны плоскости образца.

Структура образцов GN1-GN4, осажденные в две стадии, по данным рентгеновской дифракции представлены зернами AlN двух типов: одни зерна AlN имеют плоскости (002) параллельные плоскости

(002) сапфировой подложки, у других нормали к плоскостям (002) AlN отклоняются на $\sim 15^\circ$ от нормали образца. Кроме того, покрытия GN3 и GN4 имеют заметное количество зерен, дающих пики дифракции от плоскостей (100). Невысокие пики от плоскостей (100), обуславливают уменьшение ориентированности структуры покрытия. При этом в покрытиях дополнительно присутствуют зерна AlN, оси c которых отклонены от нормали к поверхности образца на угол $\sim 76^\circ$ для (100) пика.

Одной из причин отклонения осей c на угол $\sim 15^\circ$ от нормали поверхности образца, по-видимому, является высокая свободная поверхностная энергия боковых граней (100) и/или (110) зерен AlN. Так, если два зерна растут недалеко друг от друга, то энергетически выгоден будет наклон одного зерна к другому с касанием и дальнейшим сращиванием, вследствие чего значительно сократится удельная поверхность и поверхностная энергия [4, 5]. Вероятно, что в покрытиях число зерен, которые срослись под определенным углом, зависит от эпитаксиальных соотношений. Для случая наклона на 15° должно происходить срастание плоскости (100) или (110) AlN с плоскостью (703) AlN. В общем случае, присутствие наклонных зерен свидетельствует о наличии в покрытии угловых межстолбчатых границ, наполненных краевыми дислокациями или образующие клиновые поры.

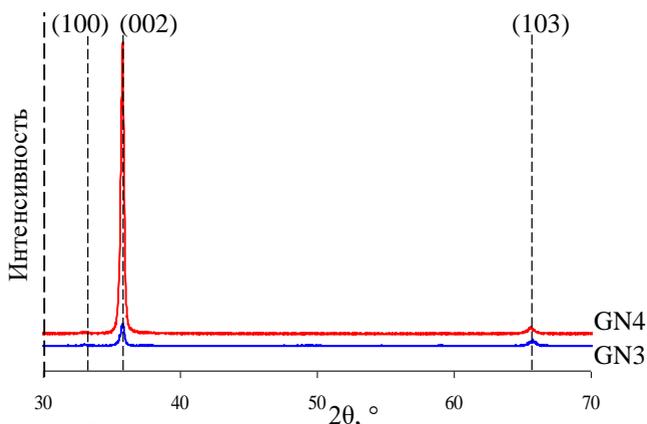
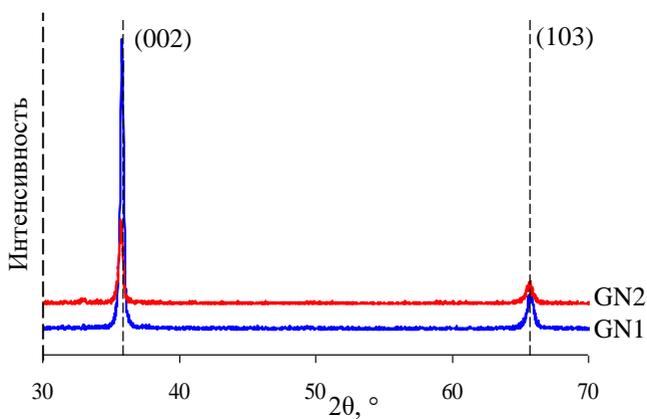


Рисунок 1 – Дифрактограммы образцов, осажженных в две стадии на сапфировых подложках.

Изменение условий осаждения на начальных стадиях влияет на параметры элементарной ячейки AlN , относительную концентрацию зерен различной ориентации и размер зерен (табл. 3).

Таблица 3 – Характеристики покрытий, осажденных по двухстадийным режимам

Код	Толщина покрытия, нм	Средний размер зерен*, нм	$I_{(103)}/\Sigma I_{(hkl)}$	Параметры ячейки AlN (Å)		d (нм) по пику (103)
				a	c	
			0,10	3,112	5,009	31,2
			0,19	3,111	5,019	27,9
			0,15	3,108	5,016	27,7
GN4			0,02	3,125	5,016	31,4

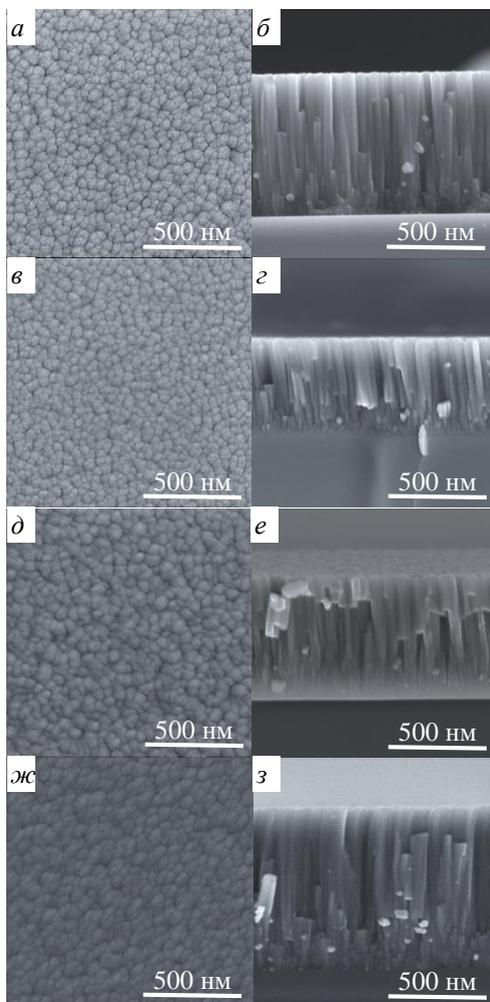
* – по данным микроскопии

В отличие от покрытия, осажденного при 30 об. % N₂, образец GN2 имеет параметр *a*, свойственный массивному AlN, а также больший диаметр зародышей при меньшем их количестве. Это подтверждает предположение о том, что в режиме осаждения при 30 об.% N₂ и 6А на структуру покрытия подложка оказывает большее влияние, чем поток энергии из плазмы. Действительно, слой, полученный на первой стадии при 10 А и 370 В, по дополнительным исследованиям имеет параметр *a* равный 3,116 Å, который в дальнейшем «наследуется» слоем, осажденным на второй стадии. Аналогичные процессы реализуются при осаждении покрытия GN1, которое дополнительно испытывает бомбардировку нейтралами на второй стадии и имеет из-за этого меньший параметр *c*.

Для покрытий GN3 и GN4 структура первичных слоев, осажденных при 3 А, испытывает значительное влияние сапфировой подложки и содержит повышенное количество дефектов, так как напряжение разряда на этой стадии составляло ~290 В. Это привело не только к появлению зерен с дополнительными направлениями ориентации, но и к ожидаемому росту параметра *a* при увеличении тока (и, соответственно напряжения) разряда из-за усиления подвижности атомов. Заметим, что в магнетронном методе напыления используется аномальный газовый разряд, для которого рост тока сопровождается увеличением напряжения разряда.

На рис. 2 приведены микрофотографии поверхности и фрактограммы пленок нитрида алюминия. Изображение морфологии поверхности покрытий нитрида алюминия, показывает нанокристаллическую однородную и плотную поверхность. Из фрактограмм образцов видно, что слой AlN на сапфире имеет столбчатую структуру. На всех полученных снимках столбчатая

структура покрытия имеет направление вдоль нормали к поверхности подложки.



2 – AlN : GN1 (,); GN2 (,); GN3 (,); GN4 (,)

Выводы. Анализ структур по рытй, осажденных в две стадии, подтвердил их чувствительность строению первичного слоя, если

осаждение основного (второго) слоя происходит в области перехода состояния мишени от частично к полностью закрытой AlN_x . Учитывая зависимости структурных характеристик покрытий от режима их осаждения, можно предположить, что многостадийное магнетронное напыление может стать мощным инструментом управления структурой покрытий и позволит формировать малодефектные слои AlN на сапфире.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-42-08047 «р_офи_м» и программы стратегического развития БГТУ им В.Г. Шухова.

Авторы выражают благодарность ЗАО «Монокристалл» и ООО «БЗС «Монокристалл»» за помощь в проведении исследований.

Список литературы:

1. Нарцев В.М., Зайцев С.В., Прохоренков Д.С., Алексеев А.Н., Ващилин В.С. Способы магнетронной эпитаксии нитрида алюминия на сапфире // Материалы (статьи) Региональной научно-технической конференции по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и правительством Белгородской области. 2015. С. 288-313.
2. Manova D, Ions W, Gerlach, S, Mändl. Thin Film Deposition Using Energetic // Materials. 2010. No. 3. P. 4109-4141.
3. Monteagudo-Lerma L., Valdueza-Felip S., Núñez-Cascajero A., González-Herráez M., Monroy E., Naranjo F.B. Twostep method for the deposition of AlN by radiofrequency sputtering // Thin Solid Films. 2013. V. 545. P. 149-153.
4. Deng R., Muralt P., Gall D. Biaxial texture development in aluminum nitride layers during off-axis sputter deposition // J. Vac. Sci. Technol. 2012. № 30, P. 9.
5. Зайцев С.В., Ващилин В.С., Прохоренков Д.С., Нарцев В.М., Евтушенко Е.И., 2015. Структура тонких пленок диоксида олова, формируемых методом дуального магнетронного распыления// Вестник БГТУ им.В.Г. Шухова, № 5. 2015. С. 228-231.

МИКРОСТРУКТУРА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

nelubova@list.ru

Нелубова В.В., канд. техн. наук, доц.,

Бондаренко А.И., канд. техн. наук,

Переверзев М., студент

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

Аннотация. В работе показаны структурные особенности цементного камня на основе композиционного вяжущего. Установлен характер структурообразования цементного камня на основе КВ, заключающийся в двойной роли реакционно-активного микродисперсного кремнезёма, получаемого в процессе механоактивации кварцевых пород различного генетического типа и являющихся гетерофазными наноструктурированными материалами. С одной стороны аморфизованная оболочка кварца играет роль пуццоланового компонента, с другой – кристаллическое кварцевое ядро выступает в качестве субмикронного заполнителя.

Ключевые слова: аморфизация, кварцевые породы, механоактивация, кремнезем, композиционные вяжущие.

Композиционные вяжущие являются эффективным «инструментом» сокращения доли клинкерной составляющей в композитах при сохранении требуемых эксплуатационных свойств готовых изделий с их применением, что доказано многочисленными исследованиями []. При этом свойства вяжущих напрямую зависят от фазового состава сформированных в результате гидратационных процессов новообразований и их морфологии. Предварительными исследованиями было показано снижение концентрации свободного портландита в ряду: портландцемент → КВ на магматогенно-интрузивном кварце → КВ на метаморфогенном кварце при использовании композиционных вяжущих. Целью настоящей работы является изучение особенностей структуры сформированных систем.

Исследования проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Анализируя микроструктуру цементного камня при использовании вяжущего низкой водопотребности на основе сырья различного генезиса можно отметить, что общая структура характеризуется схожими по морфологии образованиями (рис. 1), однако отличается пористость матрицы. Как было установлено ранее, при одинаковой удельной поверхности молотых кварцитопесчаника и песка частицы второго несколько крупнее. Возникающая в результате преобладания достаточно крупных частиц в молотом песке некоторая неоднородность способствует бóльшей пористости цементной матрицы (рис. 1, а, б). При уменьшении размеров частиц в случае кварцитопесчаника, как уже отмечалось, система приобретает большую однородность, что выражается в меньшей пористости цементного камня за счет более плотной упаковки (рис. 1, г, д).

Несмотря на различия в размере частиц применяемого сырьевого компонента, характер новообразований цементного камня существенно не меняется (рис. 1, в, е).

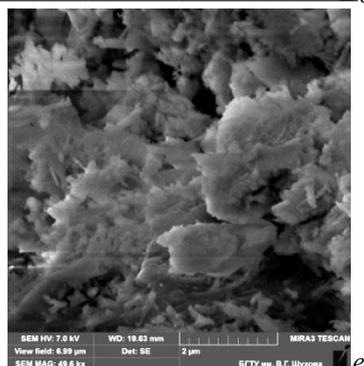
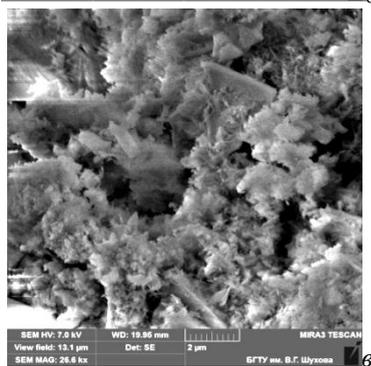
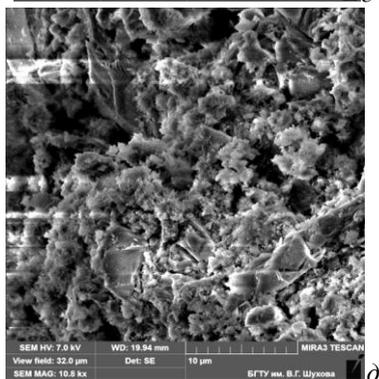
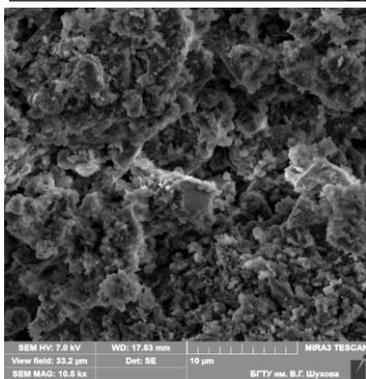
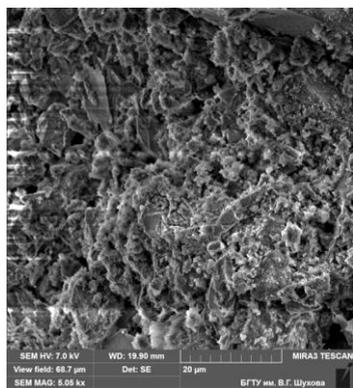
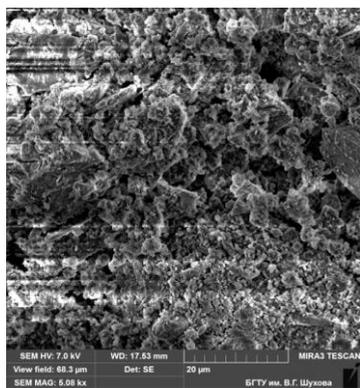


Рисунок 1 – Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток при использовании ВНВ-50 на основе: *а-в* – песка Корочанского месторождения; *з-е* – отсева дробления кварцитопесчаника

Большее количество мелких частиц в кварцитопесчанике, а также значительная аморфизация их поверхности, делают его более реакционно-способным, что способствует достаточно быстрому и полному взаимодействию с продуктами гидратации цемента в ранние сроки твердения. При этом происходит активное связывание свободной извести в период твердения, что в последствии дает значительное снижение содержания портландита, что и подтверждено количественными методами. Уменьшение количества портландита происходит и на составе на основе песка, но в значительно меньшей мере.

Отмечена хорошая адгезия новообразований к минеральным зернам кремнеземсодержащего компонента, выступающим в качестве подложки для их образования. При этом характер новообразований не меняется при использовании различного кремнеземсодержащего сырья. Основная матрица новых фаз представлена хлопьями рентгеноаморфных глобулярных образований с трудноразличимыми формами кристаллов, предположительно гидросиликатов кальция размером менее 200 нм.

Анализ микроструктуры цементного камня, полученных на ВНВ с 50%-ной заменой клинкерной составляющей на кварцевый компонент различной генетической принадлежности, позволил подтвердить результаты изучения фазового состава этих композиций. Применение более активного кварцитопесчаника позволяет получить плотную матрицу, образующуюся за счет более мелких и аморфизованных зерен кварца, обладающих значительной реакционной способностью. Ее проявления заключается в том числе в пуццолановой активности кремнеземистой добавки, характеризующейся связыванием свободной извести и уменьшением содержания портландита в цементной матрице. Это способствует достаточно полному протеканию реакций гидратации цементного вяжущего с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция, являющихся основными носителями прочностных свойств разработанных композитов.

Таким образом, установлен характер структурообразования цементного камня на основе КВ, заключающийся в двойной роли реакционно-активного микродисперсного кремнезёма, получаемого в процессе механоактивации кварцевых пород различного генетического типа и являющихся гетерофазными наноструктурированными материалами. С одной стороны аморфизованная оболочка кварца играет роль пуццоланового компонента, с другой – кристаллическое кварцевое ядро выступает в качестве субмикронного заполнителя.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-43-08020/14 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Трунов П.В. Оптимизация условий твердения композиционных вяжущих: монография. Германия: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2012. 97 с. ISBN 978-3-8484-1919-7.
2. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Бондаренко А.И., Кобзев Е.В. Реотехнологические свойства суспензий механоактивированных кварцевых компонентов и композиционных вяжущих на их основе // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Архитектура и строительство. 2013. №31-2 (50). С. 179–185.
3. Строкова В.В., Нецвет Д.Д., Нелюбова В.В., Серенков И.В. Свойства композиционного вяжущего на основе наноструктурированной суспензии // Строительные материалы. 2017. № 1-2. С. 50–54.
4. Строкова В.В., Жерновский И.В., Фоменко Ю.В. О влиянии размерных параметров полиморфных кварца на его активность в композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2007. №3. С. 72–73.
5. Жерновский И.В., Строкова В.В., Бондаренко А.И., Кожухова Н.И., Соболев К.Г. Структурные преобразования кварцевого сырья при механоактивации // Строительные материалы. 2012. №10. С. 56–58.
6. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Боцман Л.Н., Огурцова Ю.Н., Хахалева Е.Н. Композиционное вяжущее для монолитного строительства в северных регионах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 36–42.
7. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Жерновский И.В., Бондаренко А.И. Влияние механоактивации на фазовую, размерную и реакционную вариативность кремнеземных компонентов композиционных вяжущих // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским Фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области, Белгород, 9–10 октября 2015 года. С. 314–319.

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ЕДИНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

ooows@mail.ru

Новиков И.А., канд. техн. наук, доц.,
Боровской А.Е., канд. техн. наук, доц.,
Боровская О.Ю.,
Буряченко Н.А.

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

Аннотация. Статья посвящена вопросу создания единой имитационной модели транспортной инфраструктуры городской агломерации. В статье подробно расписан процесс создания модели на основании анализа характеристик транспортного потока и параметров улично-дорожной сети городской агломерации. Также в статье указана необходимость использования матрицы транспортных корреспонденций для создания имитационной модели, описан процесс ее восстановления и возможности дальнейшего использования.

Ключевые слова: имитационная модель, транспортная инфраструктура, матрица транспортных корреспонденций, улично-дорожная сеть.

На сегодняшний день, в соответствии с нормативными документами о программах комплексного развития транспортной инфраструктуры поселений, городских округов [1] и комплексных схемах организации дорожного движения [2], все решения в области планирования транспортной инфраструктуры подлежат оценке с помощью различных видов моделирования, среди которых одним из наиболее перспективных является имитационное моделирование на основе реальных данных о характеристиках транспортного потока и геометрических параметрах улично-дорожной сети [3]. Для выполнения этих требований необходимо сперва провести диагностирование транспортной системы городской агломерации, понять ее структуры, т.е. выявить основную магистральную сеть, и оценить как влияние въезжающего в ядро города транспорта, так и основные направления въезда [5]. Так на примере Белгородской агломерации по уровню загрузки был сформирован граф дорог опорной сети города (рисунок 1).

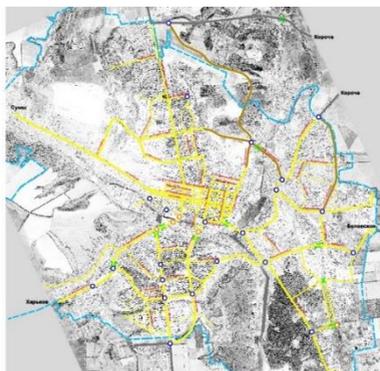


Рисунок 1 – Граф опорной сети г. Белгорода

Основываясь на уровне загрузки улично-дорожной сети диагностируются основные направления въезда и выезда маятниковых сообщений с пригородом (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема основных въезжающих потоков в г. Белгороде

Также проводятся исследования основных направлений въезда и выезда во время утреннего часа «пик», как обладающего наибольшей плотностью (рисунок 3) [4]. При этом исследования проводятся на протяжении 2-х часов, чтобы оценить влияние режимов работы различных предприятий и организаций по времени начала рабочего дня, в том числе с учетом «школьных» перевозок.

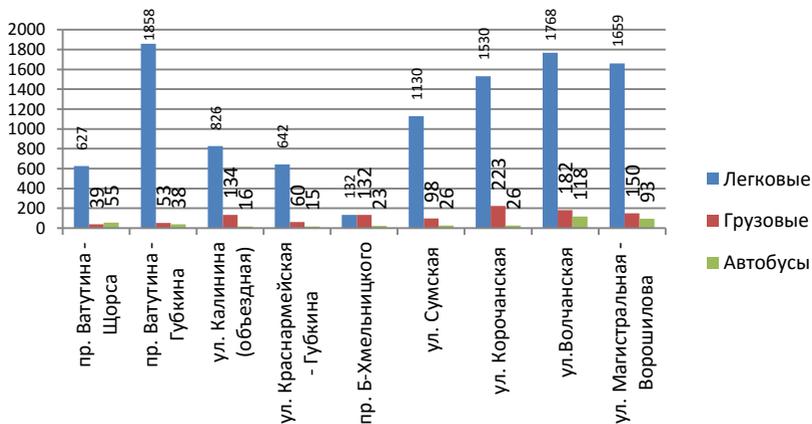


Рисунок 3 – Характеристики основных въезжающих потоков в г. Белгороде

На основании получаемых данных определяется уровень загрузки улично-дорожной сети, которая описывается картограммой автомобилепотоков (рисунок 4).

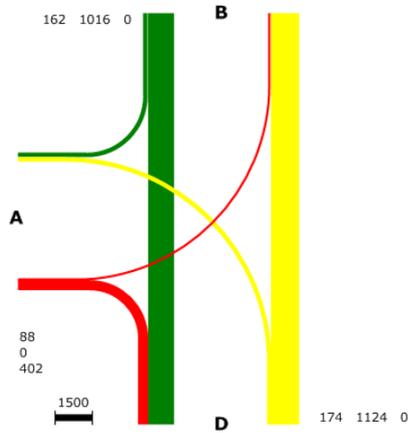


Рисунок 5 – Картограмма интенсивности движения на пересечении проспекта Б. Хмельницкого – ул. Чичерина (А – со стороны ул. Сумской), авт/ч

Далее собираются данные, на основании геодезических изысканий или генерального плана в масштабе 1:500 о характеристиках проезжей части, которые сводятся в единую ГИС систему в виде описания дорожного графа или формализованного чертежа (рисунок 6). При этом обязательно указание всех технических средств организации движения.

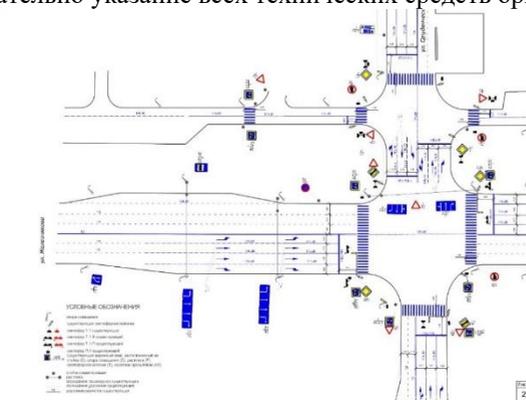


Рисунок 6 – Данные о характеристиках УДС с реальными размерами и ТСОДД

Для создания имитационной модели дополнительно требуется создание матрицы транспортных корреспонденций [6]. Она может быть

сформирована на основании фактических данных, полученных при помощи систем фотовидеофиксации (рисунок 7) или полученных путем опроса водителей транспортных средств при полной остановке движения в определенных сечениях улично-дорожной сети (метод «шлагбаума»).

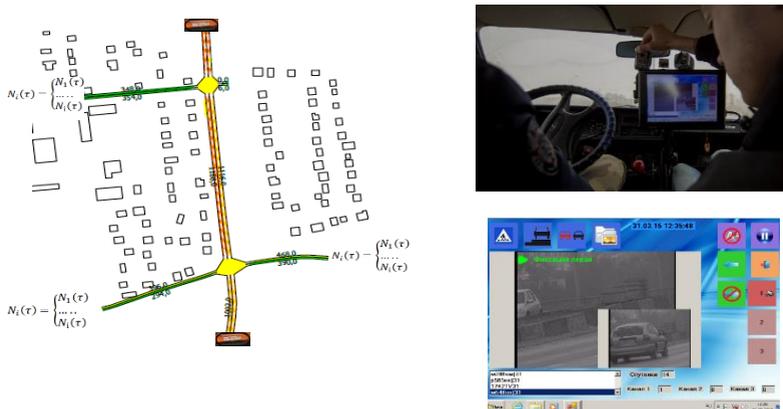


Рисунок 7 – Система создания матрицы транспортных корреспонденций при помощи системы фотовидеофиксации «Дозор -2М»

При этом участки замера формируются на основании разбиения города на транспортные зоны (рисунок 8).

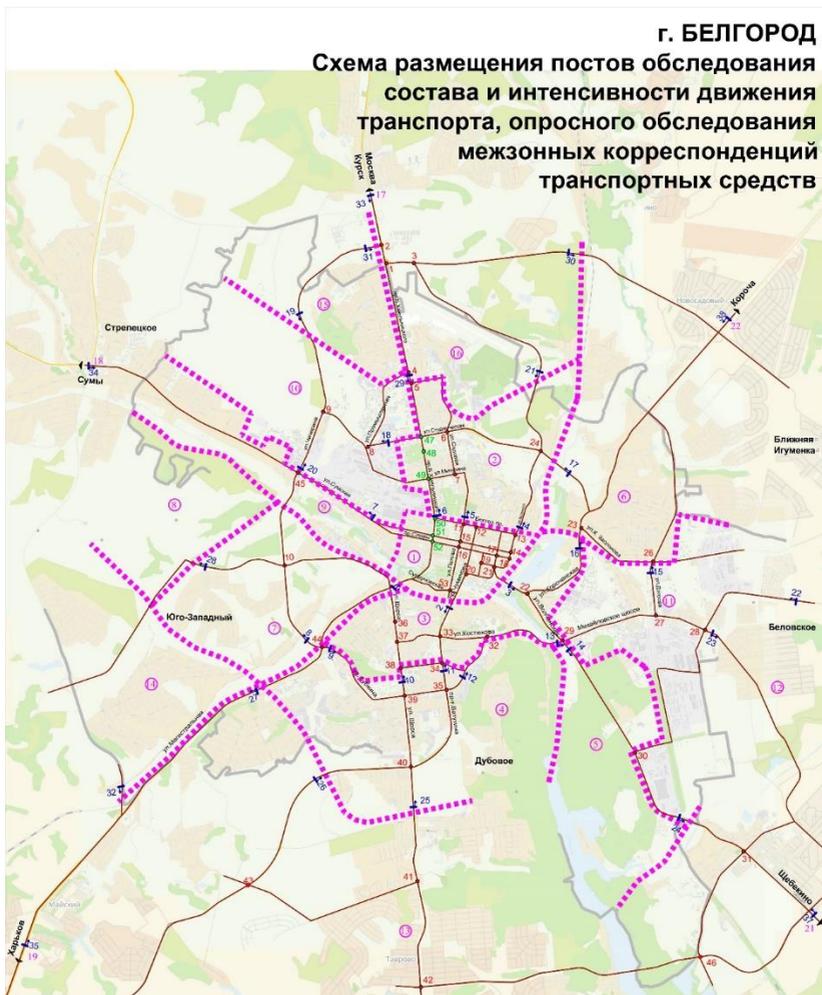


Рисунок 8 – Схема обследования межзонных транспортных корреспонденций

На основании полученных данных формируется матрица межзонных корреспонденций (рисунок 9). Данные из матрицы, совместно с интенсивностями движения и распределением транспортных потоков на пересечениях заносятся в имитационную модель мезо или макроуровня.

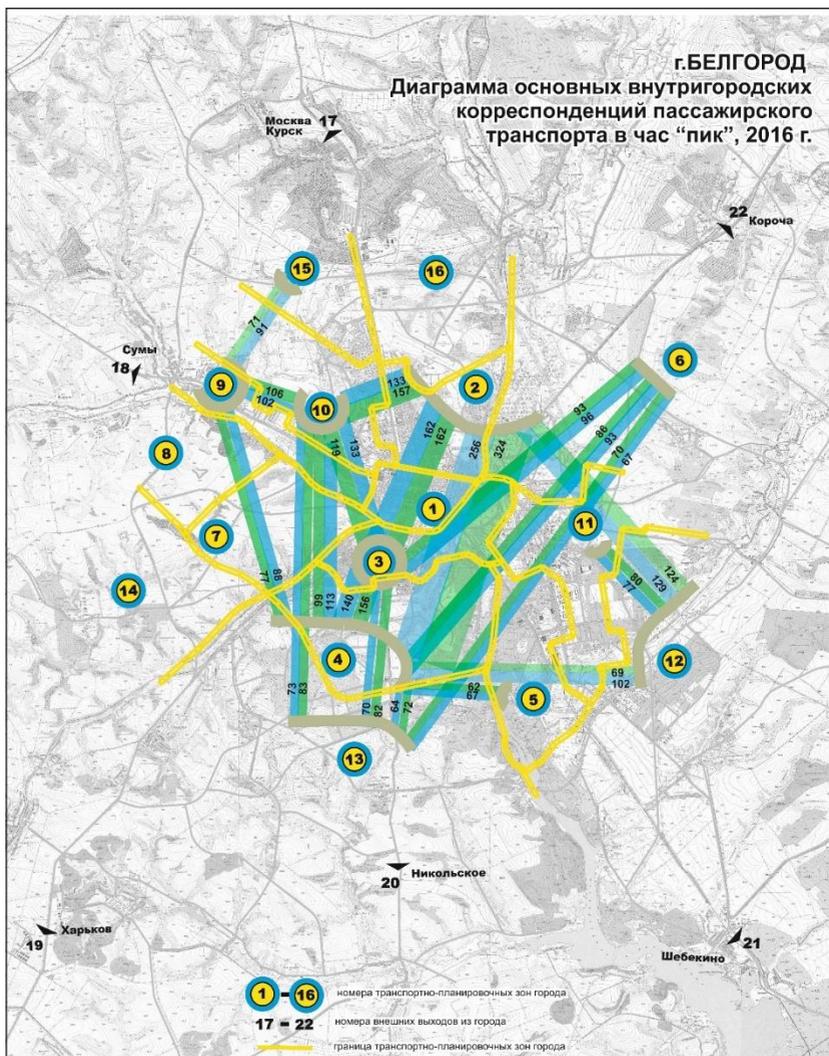


Рисунок 9 – Матрица внутригородских транспортных корреспонденций в утренний час пик

Далее в модель вносятся предлагаемые варианты изменений УДС, режимов функционирования объектов, например введение системы платных парковок. Данные изменения можно описать различными

способами. Их можно представить графическим способом, допустим планировочными решениями (рисунок 10).

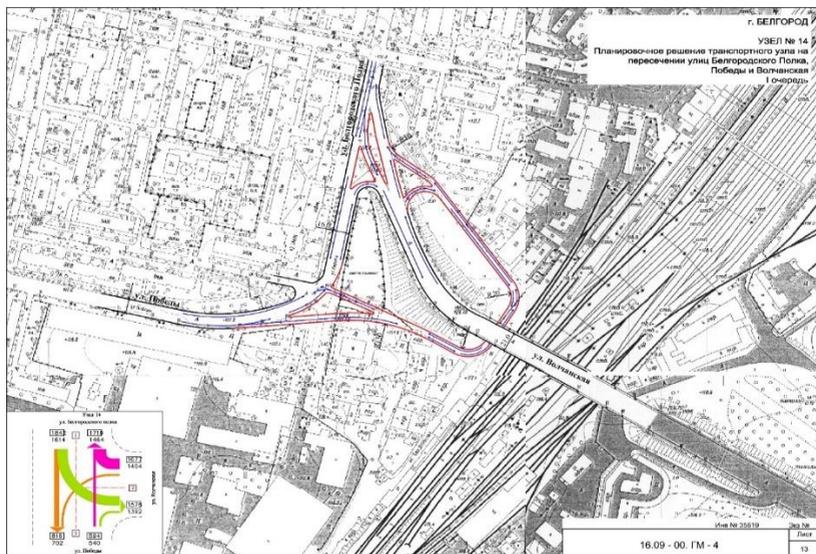


Рисунок 10 – Планировочное решение с прогнозируемыми показателями распределения транспортного потока на объекте

Также их можно представить функциональными способами, подобно предложенному на рисунке 11.

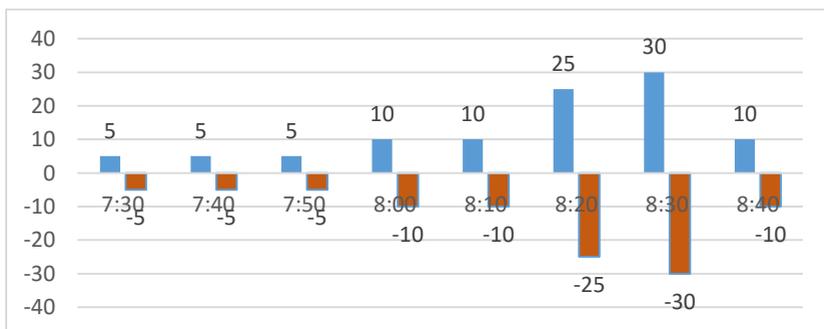


Рисунок 11 – Временное распределение въезжающего и выезжающего транспорта с парковки единичного элемента вновь возводимого объекта

Далее разрабатываются сценарии развития ситуации, как на конкретном объекте, так и на сети в целом, выбираются наиболее неблагоприятные условия. Такими условиями могут стать рост уровня нагрузки на УДС, которая определяется исходя из уровня автомобилизации с прогнозом на 10-15 лет, или же климатические изменения. Исходя из самых неблагоприятных сценариев строится итоговая модель и проверяются принятые решения на их работоспособность.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08012 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Постановление Правительства РФ "Об утверждении требований к программам комплексного развития транспортной инфраструктуры поселений, городских округов" от 25 декабря 2015 г. № 1440 // Официальный интернет-портал правовой информации. 31.12.2015 г.
2. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации "Об утверждении Правил подготовки проектов и схем организации дорожного движения" от 17 марта 2015 г. № 43 // Официальный интернет-портал правовой информации. 19.06.2015 г.
3. Кущенко Л.Е., Дубров Р.А. Моделирование транспортных потоков с целью предотвращения процесса заторообразования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, сб. материалов междунар. заочн. научн.-практ. конф. 2015 №4. С. 356-359.
4. Боровской А.Е., Сокорев С.И., Новиков И.А. Создание точных моделей транспортных потоков на основе геоинформационных данных // Информационные технологии и инновации на транспорте материалы 2-ой Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией А.Н. Новикова. 2016. С. 10-19.
5. Новиков И.А., Кущенко Л.Е., Ковалева Е.А. Исследование интенсивности движения крупногабаритных транспортных средств на въезде в город Белгород // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса сборник статей IX Всероссийской научно-производственной конференции. МНИЦ ПГСХА. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2015. С. 58-61.
6. Новиков И.А., Кущенко Л.Е., Кущенко С.В. Улучшение функционирования улично-дорожной сети на основе электродинамического моделирования // Вестник развития науки и образования. Саратов 2014. № 2. С. 20-23.

7. Шмыкова И.И., Шевцова А.Г. Исследование перепадов интенсивности на примере «Т»-образного пересечения. // Материалы VIII Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум»
<http://www.scienceforum.ru/2016/1416/16756>

СНИЖЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОНТЕЙНЕРА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ КМА

belpavlenko@mail.ru

Павленко В.И., д-р техн. наук, проф.,
Ястребинский Р.Н., канд. физ.-мат. наук, доц.,
Матюхин П.В., канд. техн. наук, доц.,
Ястребинская А.В., канд. техн. наук, доц.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментов по сорбции радионуклидов на поверхности легированной и перлитной стали радиационно-защитного транспортного контейнера на основе железорудного сырья КМА. При переводе стали в пассивное состояние путем пассивации в азотной кислоте ($\text{pH}=3$) наблюдается значительное снижение сорбции радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs (в 7-10 раз) по сравнению с не пассивированной сталью. На нержавеющей стали сорбция ^{137}Cs значительно превосходит сорбцию ^{60}Co , тогда как на поверхности перлитной стали, которая в этих условиях находится в активном состоянии, наблюдается обратная картина – сорбция ^{60}Co превосходит сорбцию ^{137}Cs . Обработка как легированной, так и перлитной стали золями оксида алюминия позволяет дополнительно снизить сорбцию радионуклидов: а) по ^{137}Cs на легированной стали в 6 раз, а на перлитной стали - в 9 раз; б) по ^{60}Co на легированной стали в 6 раз, а на перлитной стали - в 4 раза.

Ключевые слова: транспортные контейнеры, перлитные стали, легированные стали, радионуклиды, сорбция, стационарный потенциал, химическая обработка, снижение радиоактивности.

Обеспечение радиационной и технической безопасности на объектах АЭС достигается реализацией комплексного подхода к решению этой сложной проблемы при эксплуатации ядерно-энергетических установок (ЯЭУ). При эксплуатации транспортных упаковочных контейнеров (ТУК) происходит коррозионное разрушение внешней металлической оболочки, сопровождающееся образованием продуктов коррозии (ПК), образование прочно сцепленных с металлом

пленок продуктов коррозии и их рыхлых отложений на поверхности металла. Снижение скорости коррозии конструкционных материалов приводит к повышению уровня обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации ТУК [1-3].

В процессе эксплуатации на внутренних поверхностях ТУК накапливаются радиоактивные продукты коррозии, причем активность радионуклидов ^{60}Co (в основном долгоживущего ^{60}Co) составляет не менее 90% общей активности отложений. Основным источником радиоактивного кобальта являются продукты коррозии нержавеющей стали, содержащей 10% никеля, в котором много примесного кобальта.

Улучшить радиационную обстановку можно также за счет снижения сорбции радионуклидов на внешних поверхностях ТУК. В связи с этим авторами рассмотрены возможные пути снижения сорбции радионуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs поверхностью перлитных и легированных сталей с ТУК целью снижения их радиоактивности.

В работе использованы образцы углеродистой перлитной стали марки Ст20 и хромоникелевой аустеновой сталь марки 08X18H10T.

При изучении сорбции радионуклидов радионуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs образцы стали, представлявшие собой продольно распиленные пополам трубки парогенератора длиной 50 мм с площадью поверхности 50 см², помещали в стеклянные стаканчики с водной средой, содержащей указанные радионуклиды. Удельная активность водной среды составляла (2-5) 10⁶ Бк/л. Выдержка образцов проводилась при 20-25°C и при периодическом перемешивании в течение времени, достаточного для достижения сорбционного равновесия. Соотношение объем раствора/площадь поверхности образцов поддерживали равным 10/1 см³/см². По достижении сорбционного равновесия образцы извлекали из водной среды, промывали дистиллированной водой, высушивали на воздухе и радиометрировали. Измерение активности проводили на установке, включающей блок детектирования РАДЭК БДЭГ2-СП и пересчетный прибор РАДЭК БПВН-2000-12. Для перехода от относительной активности к абсолютной, проводили калибровку измерительной аппаратуры по стандартным мерам активности с учетом геометрии образцов.

В табл. представлены результаты экспериментов по сорбции радионуклидов и замечена ее связь с величиной равновесного электрохимического потенциала.

Видно, что чем выше РЭХП, тем ниже сорбция. Наибольшая она на стали, обработанной соляной кислотой, где стационарный потенциал минимальный, а наименьшая – на образцах, обработанных раствором

нитрата алюминия с азотной кислотой, где электрохимический потенциал наибольший (рис. 1-2).

Таблица – Влияние условий обработки стали 08X18H10T на величину равновесного электрохимического потенциала РЭХП и на сорбцию радионуклидов ^{60}Co и цезия- ^{137}Cs

№ п/п	Способ обработки поверхности образца	Сорбция радионуклидо в Бк/см ²	Величина стационарного равновесного потенциала, мВ (отн. н.в.э.)
1	2	3	4
1	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2-3, промывка дистиллятом	^{137}Cs 1627 ^{60}Co 276	+ (130-140)
2	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2-3, промывка дистиллятом с последующей обработкой образца концентрированной (разбавление дистиллятом 1:1) соляной кислотой в течение 10 минут при 20-25°C с окончательной промывкой образца дистиллятом.	^{137}Cs 2019 ^{60}Co 576	+80 с постепенным повышением в течение 20-25 минут до стационарного значения +135
3	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2-3, промывка дистиллятом. Обработка образца в течение 3 час. при 90-100°C в 3 % растворе щавелевой кислоты. Промывка образца дистиллятом после кислотной обработки.	^{137}Cs 1811 ^{60}Co 309	+ (150-160)
4	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2-3, промывка дистиллятом. Обработка образца в течение 3 час. при 90-100°C в 3 % растворе щавелевой кислоты, содержащем 0,1 % пероксида водорода. Промывка образца дистиллятом после кислотно-	^{137}Cs 1738 ^{60}Co 301	+ (170-172)

	пероксидной обработки.		
5	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2-3, промывка дистиллятом. Обработка образца в течение 3 час. при 90-100°C в 3 % растворе щавелевой кислоты. Пассивация в 10^{-3} моль/л растворе азотной кислоты в течение 4 час. при 90-100°C. Промывка запассивированного образца дистиллятом.	^{137}Cs 1524 ^{60}Co 254	+ (160-165)
6	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2-3, промывка дистиллятом. Обработка образца в течение 3 час. при 90-100°C в 3 % растворе щавелевой кислоты. Пассивация в 10^{-3} моль/л растворе азотной кислоты с добавкой нитрата алюминия (золь $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-A}$ (20мг/л в пересчете на алюминий) в течение 4 час. при 90-100°C. Промывка запассивированного образца дистиллятом.	^{137}Cs 1103 ^{60}Co 87	+ (188-190)

Сорбция цезия-137 почти на порядок выше сорбции кобальта-60. Объяснение полученного эффекта простое: чем положительнее заряжена поверхность металла, тем в большей степени происходит отталкивание от нее положительных ионов и, как следствие, сорбция снижается. Более положительные ионы Co^{2+} отталкиваются от положительно заряженной поверхности в большей степени, чем ионы Cs^+ [4-5].

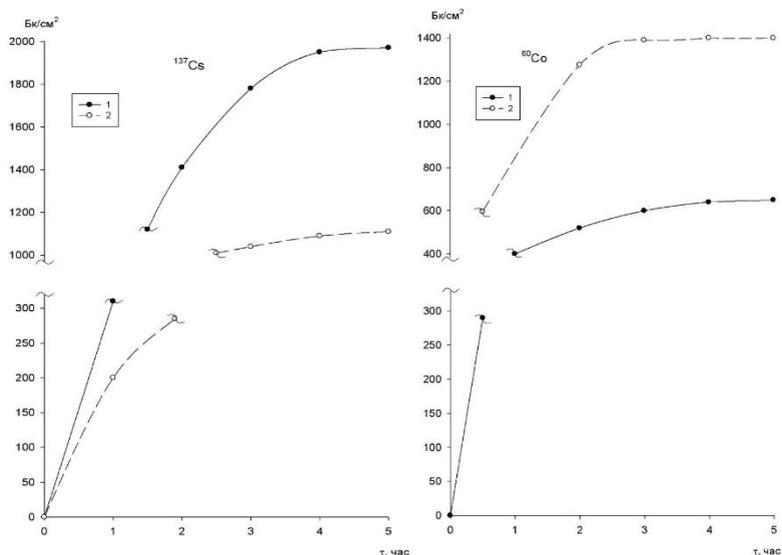


Рисунок 1 – Кинетика сорбция радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co на поверхности стали после пассивации в азотной кислоте (50мг/л, pH=3):
1 - легированная сталь 08X18N10T; 2 - перлитовой стали Ст20

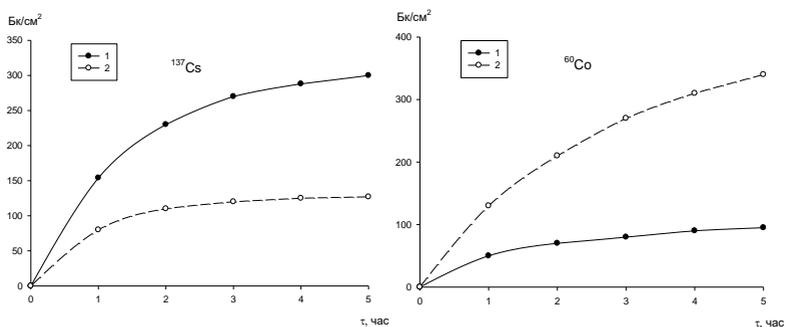


Рисунок 2 – Кинетика сорбция радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co на поверхности стали после пассивации в азотной кислоте (50мг/л, pH=3) + гидрозоле Al_2O_3 (В) (10мг/л) + обработка нитритом натрия (10мг/л): 1 - легированная сталь 08X18N10T; 2 - перлитовой стали Ст20

Примечания:

1. Образцы имели форму полуцилиндров (распиленная на две части парогенераторная трубка) высотой около 50 мм с площадью поверхности 21-25 см² (первая партия образцов) и сегменты

парогенераторной трубки (вторая партия образцов) с высотой около 50 мм и площадью поверхности 8-9 см².

2. При обработке образцов растворами поддерживали соотношение $V_{р-ра}/S_{образца} = 10/1$ мл/см².

3. Равновесный стационарный потенциал определяли, помещая образец в боратный буферный раствор.

В заключении следует еще раз отметить, что добавка коллоидного раствора - золя Al_2O_3 в пассивирующие кислые азотнитратные растворы позволяет значительно повысить защитные свойства образовавшихся покрытий и предотвратить развитие местных видов коррозии (язв, питтингов, растрескивания и т.п.). Ионы алюминия необходимы для инициирования образования защитных покрытий на тех участках поверхности металла, где нет центров кристаллизации оксидов, т.е. на активных участках.

Выводы

Представлены результаты экспериментов по сорбции радионуклидов на поверхности легированной и перлитной стали и замечена ее связь с величиной равновесного электрохимического потенциала.

При переводе стали в пассивное состояние путем пассивации в азотной кислоте (рН=3) наблюдается значительное снижение сорбции радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs (в 7-10 раз) по сравнению с не пассивированной сталью. На нержавеющей стали сорбция ^{137}Cs значительно превосходит сорбцию ^{60}Co , тогда как на поверхности перлитной стали, которая в этих условиях находится в активном состоянии, наблюдается обратная картина – сорбция ^{60}Co превосходит сорбцию ^{137}Cs .

Обработка как легированной, так и перлитной стали золями оксида алюминия позволяет дополнительно снизить сорбцию радионуклидов: а) по ^{137}Cs на легированной стали в 6 раз, а на перлитной стали - в 9 раз; б) по ^{60}Co на легированной стали в 6 раз, а на перлитной стали - в 4 раза.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08067 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Малышев А.Б. О развитии ядерной энергетики в Российской Федерации // Бюллетень по атомной энергии. 2007. №8, С.17-19.
2. Yastrebinskii R.N., Bondarenko G.G., Pavlenko V.I. Radiation resistance of structural radiation-protective composite material based on magnetite matrix // Inorganic Materials: Applied Research, 2016, Vol. 7, No. 5, pp. 718–723.
3. Морозова И.К., Громова А.И., Герасимов В.В. и др. Вынос и отложения продуктов коррозии реакторных материалов. Атомиздат. М.. 1975. 190 с.
4. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: 1975, 235 с.
5. Шаталов А.Я. Электрохимические основы теории коррозии металлов. Воронеж.: 1971. 220 с.

ПРИНЦИПЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И СЕТИ МАЛЫХ ГОРОДОВ И АГЛОМЕРАЦИЙ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ*

perkova.margo@mail.ru

Перькова М.В., канд. арх. наук, доц.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В статье рассматривается вопрос обеспечения устойчивого развития региональной системы расселения и ее элементов. Авторами предложены принципы территориального планирования региональной системы расселения и классификация градостроительных конфликтов мотиваций. Разработана теоретическая модель устойчивого развития региональной системы расселения, включающая изучение частных характеристик территории, определение «кода» идентичности территории, ее адаптивное развитие во времени, выявление зон конфликтов мотиваций и их решение при решении задач территориального планирования.

Ключевые слова: устойчивое развитие, региональная система расселения, конфликты мотиваций, характеристика территории, теоретическая модель.

Успешное территориальное развитие страны зависит от темпов и перспектив развития региональных систем расселения. Обеспечение устойчивой среды жизнедеятельности регионов путем сохранения идентичности территории будет способствовать восстановлению равновесия между обществом и природой. Актуальность темы определяется главной целью исследования – создание методологической базы, способствующей обеспечению устойчивого развития региональной системы расселения и ее элементов (муниципальных образований, малых городов) в соответствии с императивами современности: сбалансированным социально-экономическим развитием, не разрушающим природную среду и способствующим прогрессу общества.

В качестве научного подхода к взаимосвязанной региональной системе расселения в исследовании предлагается конфликтологическая концепция устойчивого развития региональных систем расселения и системы управления территорией. Исследование было проведено на

примере Белгородской области и состояло из трех этапов. *На первом этапе был проведен* историко-культурный, географический, социально-экономический и ретроспективный анализ территории в современных административных границах Белгородской области. Изучены планировочные и социально-экономические факторы развития Белгородской региональной системы расселения и ее элементов - малых городов Бирюч, Грайворон, Валуйки, Новый Оскол, Короча, Алексеевка в исторической динамике с момента их возникновения (строительства Белгородской засечной черты).

На *втором этапе* осуществлялось структурно-пространственное моделирование с учетом социально-экономических факторов развития. Изучено пространственное развитие Белгородской региональной системы расселения с 1954 по 2014 г. и построены графики, отражающие траекторию эволюционного развития пространственных, социальных и экономических характеристик территории и позволяющие проследить структурные и количественные изменения физического пространства. Проведена качественная и количественная оценка восьми муниципальных районов и их центров – малых городов как элементов региональной системы расселения.

На *третьем этапе* разработаны принципы территориального планирования как теоретическая основа организации региональных систем расселения и логическая модель устойчивого развития Белгородской региональной системы расселения, которая предполагает разрешение конфликтов мотиваций между экологическими, историко-культурными и экономическими компонентами. Разработаны рекомендации по территориальному планированию и управлению развитием Белгородской региональной системы расселения и ее элементов.

В последние годы в мире и России активизировались исследования в области разработки принципов и индикаторов устойчивого развития. По мнению авторов, устойчивое развитие региональной системы расселения является совокупным результатом устойчивости узлов сети, степенью насыщенности пространственных связей (дорог), количества вовлекаемых природных ресурсов и должно быть направлено на разрешение конфликта интересов природной экономической и социальной подсистем [5, 6]. Переход системы из конфликтного состояния к качественно новому – бесконфликтному, является развитием ситуации. Стратегия перехода, следовательно, является стратегией развития, определяющей содержание градостроительного проекта.

В связи с этим устойчивое развитие региональной системы расселения и ее элементов (муниципальных образований), по мнению авторов, можно рассматривать как наращивание показателей роста, сочетающее стратегический подход с адаптивными способностями территории к изменению в результате влияния внешних и внутренних факторов; стимулирование мотивации ключевых экономических факторов на взаимодействие, ориентированное на достижение желательного равновесия между экономическим ростом, справедливым развитием человеческого потенциала и здоровыми продуктивными экосистемами. Территориальное планирование предлагается осуществлять на всех иерархических уровнях на основе принципов:

1) *преемственности развития* и управленческих решений согласно выделенным уровням ранжирования градостроительных систем, их взаимосвязи и взаимообусловленности;

2) дифференциации ресурсного потенциала как основы формирования каркаса устойчивого пространственного развития территории [13];

3) *идентичности места*, т.е. совокупности природных и историко-культурных свойств территории;

4) ландшафтообразности [1];

5) специализации в системе разделения труда неистощительного природопользования [7].

6) структурно-правовой соподчиненности стратегических задач и способов их решения (моделей управления процессами градостроительного развития территории) [13],

7) компактности элементов региональной системы расселения (населенных пунктов).

Логическая модель устойчивого развития предполагает разрешение конфликтов мотиваций на основе:

1) принципов регулирования устойчивым развитием территорий;

2) анализа ресурсного потенциала территории;

3) определение «кода» идентичности территории;

4) выявлении зон конфликтов мотиваций и их классификации;

5) методов разрешения конфликтов мотиваций.

Устойчивое развитие территории - это отношение совокупности частных характеристик территории, отражающих ее пространственное развитие в конкретный период времени («код» идентичности) к адаптивному развитию территории за конкретный промежуток времени и выражается в виде относительной величины структурных изменений территории (прим. авт.) (формула 1)

$$U = \frac{T}{T + \Delta T} \rightarrow 1, \quad (1)$$

T - «код» идентичности представляет собой сумму частных характеристик территории, отражающих ее пространственное развитие в конкретный период времени (формула 2).

$$T = \sum_{i=1}^{12} I_i, \quad (2)$$

где I_i – суммарный индекс частных характеристик территории
 ΔT - адаптивное развитие территории.

Представляет приращение структурных изменений территории по рассматриваемым частным характеристикам за конкретный промежуток времени (формула 3).

$$\Delta T = T - T_{\text{пр}} \quad (3)$$

В исследовании предлагается анализировать 12 частных характеристик территории, позволяющие оптимально рассмотреть территорию и определить степень ее устойчивости (табл. 1)

$$I_i = \sum I_{ij}, \text{ где } I_{ij} - \text{индекс показателя } j \text{ в группе } i$$

Индекс частной характеристики территории рассчитывается по формулам, описывающим негативные и позитивные процессы [5].

Теоретическая модель устойчивого развития территории региональной системы расселения, сформированная на основе качественного и количественного анализа экономического, социального и экологического каркасов, позволяет создать благоприятные условия жизнедеятельности человека, обеспечить инфраструктурные условия развития и диверсификации экономики, в т.ч. формирование зон опережающего развития разного вида и "точек роста" и призвана обеспечить рациональное использование природных ресурсов и сохранение ценных природных комплексов, а также позволяет прогнозировать рациональное, экологически сбалансированное развитие различных частей территории. Переход системы из конфликтного состояния к качественно новому – бесконфликтному является развитием ситуации. Стратегия перехода, следовательно, является стратегией развития, определяющей содержание градостроительного проекта. На уровне региональной системы расселения можно выделить несколько основных групп конфликтов мотиваций:

1. Пространственно - экологические (конфликт экологической ценности и антропогенной нагрузки).

2. Пространственно-социальные: конфликты социального воспроизводства, конфликт социализации и персонализации, конфликт материального и духовного

3. Пространственно-экономические: конфликт экономики и экологии

4. Пространственно-управленческие: конфликты мотиваций развития

5. Пространственно-конфигурационные: оптимизация транспортной сети в сторону замкнутости линейных элементов, а не увеличения их плотности

6. Пространственно-эстетические: конфликт эстетики и информатики [1,11] (рис.1).



Рисунок 1 – Виды градостроительных конфликтов.

Сост. Перькова М.В., Борзых Е.

Устойчивое развитие региональной системы расселения является совокупным результатом устойчивости узлов сети, степенью насыщенности пространственных связей (дорог), количества вовлекаемых природных ресурсов и должно быть направлено на разрешение конфликта интересов природной, экономической и социальной подсистем [6]. Устойчивое развитие региона находится в зависимости от рационального использования вовлекаемых в социально-экономическое развитие природных ресурсов, преемственности, обеспечении внутренних связей в управлении развитием территорий как целостной системы, активности/пассивности внешних хозяйственных (экономических) отношений, многопрофильности структуры экономической системы субъекта РФ, а также активной гражданской позиции всех групп. В связи с этим в рамках концепции устойчивого развития территории необходимо разрешение конфликтов интересов экономического и природного каркаса путем нахождения баланса, так как экономическое развитие регламентируется состоянием биосферы и зависит от ее возможностей (рис.2).

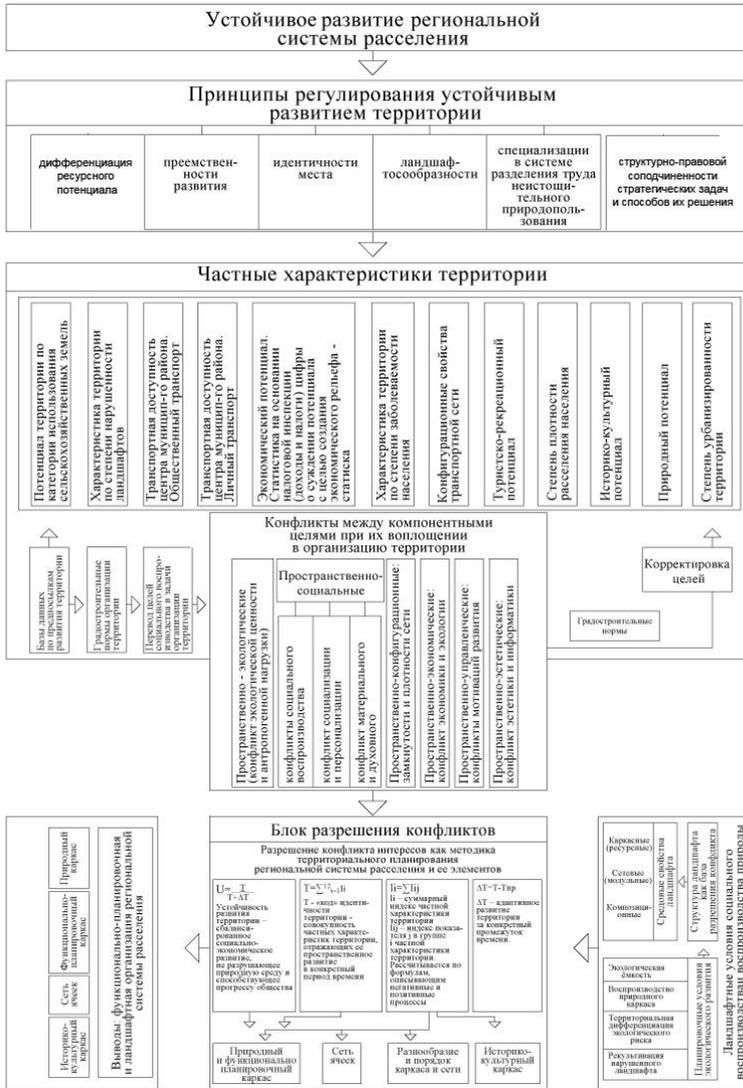


Рисунок 2 – Теоретическая модель развития сложившейся региональной системы расселения. Сост. Пенькова М.В.

В результате проведенных исследований возможно решение прикладных задач с целью подготовки документов для осуществления градостроительной деятельности на территории Белгородской области. Выполненные научные исследования, включающие анализ современного использования территории, могут обосновывать предлагаемые градостроительные решения возможных направлений развития территории муниципальных районов и прогнозируемых ограничений:

1. Определение в документах территориального планирования назначения территорий исходя из совокупности социальных, экономических, экологических и иных факторов в целях обеспечения устойчивого развития территорий, развития инженерной, транспортной и социальной инфраструктур, обеспечения учета интересов граждан РФ, муниципальных образований и субъекта РФ.
2. Обеспечение принятия органами местного самоуправления решений о резервировании земель, об изъятии земельных участков для муниципальных нужд, о переводе земель или земельных участков из одной категории в другую в целях размещения объектов местного значения и о предоставлении земельных участков, предназначенных для размещения указанных объектов.
3. Создание условий для устойчивого развития территорий муниципальных образований, сохранения окружающей среды и объектов культурного наследия как целостной идентичной среды.
4. Создание условий для планировки территорий муниципальных образований.
5. Подготовка предложений по установлению или изменению границ муниципальных образований или населенных пунктов.
6. Создание условий для привлечения инвестиций, в том числе путем предоставления возможности выбора наиболее эффективных видов разрешенного использования земельных участков и объектов капитального строительства в условиях сохранения идентичности среды.
7. Достижение согласованности проектных решений градостроительной документации муниципальных районов между собой, а также учета в градостроительной документации муниципальных районов решений документов стратегического планирования. Результатом работы послужит подготовленные проекты Схемы территориального планирования муниципальных районов, в том числе Концепций пространственного развития районов, генеральные планы и правила землепользования и застройки сельских поселений района, а

также данные для внесения в государственный кадастр недвижимости сведений об административных границах сельских поселений, населенных пунктов, а также границах территориальных зон.

Возможно также применение результатов, полученных за отчетный период, для решения социально-экономических проблем региона при реализации задач, поставленных в «Стратегии социально-экономического развития Белгородской области до 2015 г.», определении целевых ориентиров и стратегических направлений развития:

1. Развитие туристско-рекреационной инфраструктуры, предусматривающей создание условий для удовлетворения потребностей жителей Белгородской области в активном и полноценном отдыхе, способствующем укреплению здоровья, приобщению к культурным, историческим ценностям и укладу жизни сельских поселений. Областная программа развития сельского туризма предусматривает создание необходимых условий для приоритетного развития въездного и внутреннего туризма, стимулирование малого предпринимательства в данной сфере и развитие смежных отраслей экономики, обслуживающих сферу туризма, совершенствование инфраструктуры туротрасли.

2. Развитие структуры рекреационных пространств с различной рекреационной нагрузкой на ландшафтные комплексы на основе их ресурсного потенциала и устойчивости.

3. Развитие социальной инфраструктуры строящихся микрорайонов индивидуальной жилой застройки в формирующейся Белгородской агломерации (возможно, с применением кластерного подхода).

4. Определение «кода» идентичности территории населенных пунктов и муниципальных районов области с целью устойчивого развития территории.

5. Рефункционализация деградированных территорий малых городов или формирование на территории промышленных парков (иннопарков, венчурной индустрии, стартапов) с элементами общественных пространств.

6. Анализ состава и пространственного расположения объектов экономики с целью развития градообразующей базы и определения потенциальных маятниковых трудовых миграций в границах области (муниципальных районов).

7. На основе оценки различий в социально-экономическом развитии муниципальных районов и городских округов области,

проведенной с помощью 12 частных характеристик территории на основе показателей, отражающих развитие экономики и социальной сферы, совершенствование Белгородской региональной системы расселения и контроль за ее устойчивым развитием.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта № 14-41-08040 «р_офи_м» и Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Большаков А.Г. Градостроительная организация ландшафта как фактор устойчивого развития территории, диссертация док. арх. Иркутск, 2003, 424 с.
2. Департамент агропромышленного комплекса и воспроизводства окружающей среды Белгородской области: [Электронный ресурс.] URL: <http://belapk.ru>
3. Заповедники Белогорье. Офиц. сайт Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: [Электронный ресурс.] URL: <http://www.zapovednik-belogye.ru/>
4. Отчет о научно-исследовательской работе на разработку «Схемы территориального планирования Белгородской области» от 25 мая 2006 г.
5. Принципы градостроительного развития элементов и сети малых городов и агломераций Белгородской области [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.) / БГТУ им. В.Г.Шухова; рук. Перькова М.В. 2015.84 с. испол.: Трибунцева К.М., Крушельницкая Е.И., Киселев С.Н., № ГР 14-41-08040.
6. Перькова М.В. Закономерности эволюционного развития Белгородской региональной системы расселения // Архитектура и строительство России. 2015. Вып.11-12. С. 11-15.
7. Перькова М.В. Градостроительное развитие Белгородской региональной системы расселения и ее элементов // Архитектура и строительство России. 2016. Вып.4. С. 12-17
8. Перькова М.В. Родяшина К.М Стратегическое региональное планирование в РФ: основные пути развития и инструменты управления // Вестник БГТУ им. Шухова, № 9. 2016. С.77-83.
9. Петин А.М. Рациональное недропользование в железорудной провинции Курской магнитной аномалии (проблемы и пути их решения) (Автореферат на соискание ученой степени доктора. геогр. н.). Астрахань, 2010.

10. Подземные воды. Информационный бюллетень "О состоянии недр на территории РФ в 2005 году"/ Журнал "АДС-Техника": [Электронный ресурс.] URL: <http://www.adctehnika.ru/content/iziskania/3518>.
11. Фрейдин Е. Конфликтологическая концепция градостроительной деятельности (градостроительная конфликтология) // «Сибирская архитектурно-художественная школа: наука, практика, образование»: Материалы Всероссийской научно-практической конференции - Новосибирск: ООО Издательство «Сибпринт», 2007. 193 с.
12. Офф. сайт администрации Белгородской области: [Электронный ресурс.] URL: <http://belregion.ru/region/priorities/solidarity.php>
13. Юшкова Н.Г., Дологова Ю.А., Терехова И.П. Формирование технологий решения стратегических задач пространственного развития градостроительных систем // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Политематическая сер. 2009. Вып. 2 (9). Электронный доступ. www.vestnik.vgasu.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ НА ОПОРАХ КОЛЕЦ И ОБОЛОЧЕК

pobvtas@yandex.ru

Полунин А.И. канд. техн. наук, доц.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В статье рассмотрены полученные основные положения динамики вращающегося на опорах кольца, оболочки при их обработке по мобильной технологии. Рассмотрены теоремы о характере прецессионного движения возбужденной стоячей волны в теле при наличии опор, рассмотрены вопросы учета влияния неоднородности геометрических и физических параметров кольца по периметру на уравнения его динамики, влияния прецессии стоячей волны на силу внутреннего трения, управления колебаниями кольца в процессе его обработки по мобильной технологии, идентификации геометрических и физических параметров кольца при его вращении на опорах.

Ключевые слова: динамика вращающегося на опорах кольца, оболочки; прецессия возбужденных стоячих волн во вращающемся на опорах кольце, оболочке; резонансные явления во вращающемся на опорах кольце с особенностями; влияние прецессии стоячей волны на силу внутреннего трения; управление колебаниями во вращающемся на опорах кольце; идентификация геометрических и физических параметров вращающегося на опорах кольца; обработка крупногабаритных колец по мобильной технологии.

Относительно недавно появилась новая технология обработки крупногабаритных (диаметром до нескольких метров) оболочек, колец. Необходимость ее обусловлена широким распространением таких конструкций в промышленности строительных материалов, химической и в других областях. При использовании этой технологии обрабатываемое тело ставят в вертикальной плоскости на два вращающихся опорных ролика и обрабатывают приставным станочным модулем с целью придания требуемой формы (рис.1). Вследствие конечных характеристик жесткости обрабатываемого тела, его больших размеров и действия возмущающих сил от резца и других факторов в нем возникают колебания, которые влияют на процесс формообразования и его качество. Для правильного проектирования

станочного модуля, выбора режимов, обеспечивающих требуемую точность формообразования, необходимо осуществлять анализ динамики таких систем.

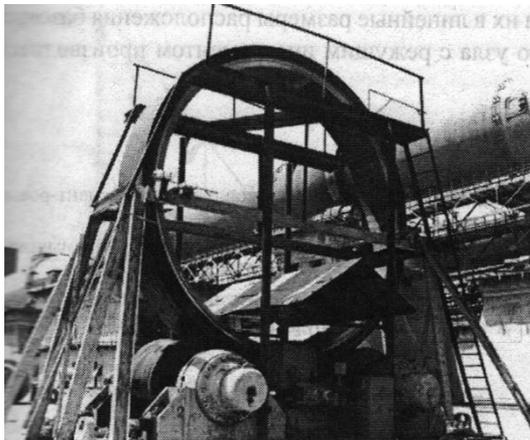


Рисунок 1 – Обработка бандажа цементной печи с использованием мобильной технологии

Вопросам анализа динамики невращающихся оболочек, колец, созданию их математических моделей посвящено большое количество работ и все задачи там практически решены. Принципиальным отличием задач динамики невращающихся оболочек, колец от вращающихся является необходимость учета у последних прецессионного движения стоячих волн, вызванных либо действием возмущений, либо специальным устройством. Первой работой по анализу этого явления является работа Брайана. Дальнейшие исследования в этом направлении связаны, в основном, с разработкой волнового твердотельного гироскопа. Фундаментальный вклад в решение возникающих там проблем внесли Климов Д.М. [1], Журавлев В.Ф. [2], Егармин Н.Е. [3]. Необходимо еще отметить работы Басараба М.А., Кравченко В.Ф., Матвеева В.А., Вильке В.Г., Меркурьева И.В., Донника А.С. и др. ученых.

При возникновении стоячей волны во вращающейся оболочке, кольце она совершает движение в инерциальном пространстве. Характер этого движения зависит от того, наложены связи на перемещения вращающегося тела или нет. В теории волнового твердотельного гироскопа показано, что угловая скорость прецессионного движения возбужденной стоячей волны во

вращающейся свободной оболочке, кольцо зависит от номера возбужденной стоячей волны и угловой скорости вращения тела.

Принципиальным отличием динамики вращающихся на опорах оболочки, кольца от свободных является наличие в первом случае связей на перемещения тела в точках опор, на которых оно вращается. Появление таких связей меняет характер прецессионного движения стоячих волн, т.к. оно может происходить только внутри опор. Исследования этого вопроса в зарубежной литературе отсутствуют, есть только в отечественной [4] – [5]. Это обстоятельство ведет к необходимости разработки теоретических основ динамических процессов во вращающихся на опорах кольцах и оболочках, а также разработки математических моделей динамики таких систем.

Решение этой проблемы дает новый научный вклад в теорию нового класса задач динамики вращающихся на опорах оболочек, колец, а также позволяет решать на научной основе практические задачи анализа динамики проектируемых и эксплуатируемых в промышленности вращающихся на опорах оболочек, колец и выбора режимов их обработки при проведении ремонтно – восстановительных работ.

Главной задачей этой проблемы является необходимость определения характера прецессионного движения возбужденных стоячих волн во вращающейся оболочке, кольце при наличии связей на перемещения и его учет в уравнениях динамики. Динамика вращающихся на опорах оболочки, кольца описывается дифференциальными уравнениями в частных производных. Учет условий связи на перемещения в точках опор, действующих сил в этом случае является весьма проблематичным и связан с введением дополнительных упрощений, ведущих к снижению точности математических моделей. Кроме того, в уравнениях необходимо учитывать прецессионное движение стоячих волн, а характер этого движения неизвестен. Поэтому более целесообразно, с точки зрения возможности учета всех условий при минимальном количестве упрощающих допущений, получить уравнения динамики в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, используя разложение перемещений точек тела в ряд Фурье и задание обобщенных координат. Такая замена позволяет легко учесть в уравнениях прецессионное движение стоячих волн, условия связей на перемещения в точках опор и действие внешних сил. Излагаемый далее материал полностью базируется на исследованиях автора.

1. Динамика вращающегося на опорах кольца с идеальными характеристиками

Рассмотрим основные положения математического моделирования динамики кольца, вращающегося на двух опорах с постоянной скоростью, при обработке его с использованием мобильной технологии. При получении уравнений динамики используются гипотезы растяжимой и нерастяжимой средней линии. Для кольца с растяжимой средней линией величины радиального U и тангенциального V перемещений точек его средней линии зададим в виде рядов Фурье

$$U = a_0 + \sum_{i=1}^N a_{ui} \cos(i(\theta + \varphi_{uj})) + \sum_{i=1}^N b_{ui} \sin(i(\theta + \varphi_{uj})),$$

$$V = \sum_{i=1}^N a_{vi} \cos(i(\theta + \varphi_{vj})) + \sum_{i=1}^N b_{vi} \sin(i(\theta + \varphi_{vj})).$$

Здесь $a_0, a_{ui}, b_{ui}, a_{vi}, b_{vi}$ – неизвестные функции времени t , которые надо определить, задают амплитуду колебаний; θ – угловая координата, задающая положение точки средней линии на кольце; $\varphi_{uj}, \varphi_{vj}$ – неизвестные функции времени, задающие прецессию стоячих волн, подлежащие определению; N – число учитываемых слагаемых ряда Фурье.

Для задания перемещений точек кольца с нерастяжимой средней линией используется условие связи $V = -\int U d\theta$. Тогда

$$U = \sum_{i=1}^N a_{ui} \cos(i(\theta + \varphi_{ui}(t))) + \sum_{i=1}^N b_{ui} \sin(i(\theta + \varphi_{ui}(t))),$$

$$V = -\sum_{i=1}^N \frac{a_{ui}}{i} \sin(i(\theta + \varphi_{ui}(t))) + \sum_{i=1}^N \frac{b_{ui}}{i} \cos(i(\theta + \varphi_{ui}(t))).$$

Кинетическая энергия вращающегося на опорах кольца определяется зависимостью

$$T = \frac{r\rho F}{2} \int_0^{2\pi} [(\dot{V} + \Omega r + \Omega U)^2 + (\dot{U} - \Omega V)^2] d\theta,$$

где r, ρ, F – соответственно радиус средней линии кольца, удельная плотность материала, площадь поперечного сечения.

Выражение для потенциальной энергии при использовании гипотезы растяжимой средней линии

$$\Pi_1 = \frac{\mu}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial V}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \right)^2 d\theta, \quad \Pi_2 = \frac{\nu}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial V}{\partial \theta} + U \right)^2 d\theta,$$

где $\mu = \frac{EJ}{r^3}$, $\nu = \frac{EF}{r}$.

Для кольца с нерастяжимой средней линией потенциальная энергия

$$\Pi = \frac{\mu}{2} \int_0^{2\pi} \left(U + \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \right)^2 d\theta,$$

где E , J – соответственно модуль Юнга и момент инерции поперечного сечения, r – радиус средней линии.

Кинетическая и потенциальная энергии станка

$$T_c = \frac{m_c \dot{x}_P^2}{2}, \quad \Pi_c = \frac{K_c x_P^2}{2}.$$

Для учета сил, влияющих на поведение кольца, получены зависимости для обобщенных сил резания, действующих по обобщенным координатам кольца с растяжимой и нерастяжимой средней линией, а также зависимости для вычисления сил внутреннего трения учитывают наличие прецессии стоячей волны. Как частный случай, из них получаются классические зависимости для вычисления сил внутреннего трения в невращающемся кольце. Для получения уравнений динамики кольца необходимо знать функции времени φ_{uj} , φ_{vj} , ($j = 1, 2, \dots, N$), задающие процессию гармоник стоячих волн в кольце, которые пока не известны. Для выяснения характера их движения в работе доказана следующая

Теорема 1.

При возникновении периодических колебаний во вращающемся с постоянной угловой скоростью на двух параллельных опорах кольце, прецессия гармоник $\varphi_{qi}(t)$ ($i=1, 2, \dots, N$), ($q=U, V$) стоячих волн происходит с угловой скоростью вращения кольца $-\Omega$, но с в обратную сторону, а прецессия стоячих волн происходит с угловой скоростью вращения кольца $-\Omega$ при $a_{qi}(t) = k_{qi} b_{qi}(t)$ или равенстве нулю одной из координат a_{qi} , b_{qi} , где $a_{qi}(t)$, $b_{qi}(t)$ – обобщенные координаты по i – й гармонике, k_{qi} – произвольный коэффициент для каждой гармоники, либо, при $a_{qi}(t) \neq k_{qi} b_{qi}(t)$ процессия стоячей волны происходит с периодической угловой скоростью $-\Omega + f_{qi}(t)$, где $f_{qi}(t)$ – периодическая функция.

Доказательство этой теоремы основано на рассмотрении прецессионного движения стоячих волн как еще одних обобщенных координат системы.

Используя результат доказанной теоремы, в работе получены системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику обрабатываемого по мобильной технологии вращающегося на опорах кольца и динамику станочного модуля для случаев кольца с растяжимой и нерастяжимой средней линией

Получение уравнений динамики вращающегося на опорах кольца связано с большим объемом аналитических преобразований. С целью их сокращения и возможности проверки их правильности предложен, разработанный автором, метод получения численных значений элементов матриц систем линейных дифференциальных уравнений для систем, поведение которых подчиняется вариационным принципам механики. Применение его не требует получения аналитических формул для элементов матриц уравнений. Проведенные расчеты показали его хорошую точность.

Для проверки адекватности полученных уравнений динамики вращающегося на опорах кольца реальным физическим процессам в работе представлены результаты проведенных физических и вычислительных экспериментов. Расчеты проводились для гипотез кольца с растяжимой и нерастяжимой средней линией. Физический эксперимент проводился на физических моделях.

Анализ полученных результатов показывает, что при малых скоростях вращения кольца результаты расчетов по разным моделям близки между собой. С увеличением скорости вращения кольца различие между значениями вычисленных собственных частот увеличивается. Объясняется это, вероятно, тем обстоятельством, что при получении уравнений кольца с нерастяжимой средней линией бралась приближенная линейная зависимость между переменными U и V из уравнения их связи. Более правильным является получение таких уравнений из уравнений кольца с растяжимой средней линией путем учета в них условия связи. В тоже время, полученные уравнения кольца с нерастяжимой средней линией можно применять для расчетов при малых скоростях вращения кольца. Особенно удобно их применение вследствие простоты при исследовании влияния различных возмущающих факторов, таких как переменная по периметру толщина кольца, кривизна, модуль упругости и др., на динамику кольца при формообразовании.

Сравнение результатов определения собственных частот вращающегося на опорах кольца, полученных при расчетах и в физическом эксперименте, показали их близость.

2. Уравнения динамики вращающихся колец с особенностями

Используемые на практике кольца и оболочки имеют особенности, заключающиеся в изменении физических и геометрических характеристик по периметру. Это обстоятельство влияет на их динамику и требует разработки математических моделей, учитывающих эти особенности. Были рассмотрены кольцо с непараллельными сторонами, с переменным по периметру модулем упругости, с переменной кривизной средней линии. Получены уравнения динамики кольца, учитывающие динамику его углового движения и привода.

При выводе уравнений динамики кольца с непараллельными сторонами рассматривались случаи растяжимой и нерастяжимой средней линии. Отклонение двух сторон кольца от параллельности задавалось формулами

$$a_1 = \sum_{i=1}^N [a_{1i} \cos(i\theta) + b_{1i} \sin(i\theta)], a_2 = \sum_{i=1}^N [a_{2i} \cos(i\theta) + b_{2i} \sin(i\theta)].$$

Кинетическая энергия кольца в этом случае равна сумме двух составляющих - кинетической энергии кольца с параллельными сторонами и второй, характеризующей непараллельность сторон. Аналогичная зависимость выполняется и для потенциальной энергии. Используя уравнение Лагранжа второго рода получены дополнительные составляющие, учитывающие непараллельность сторон, к уравнениям динамики вращающегося на опорах кольца с параллельными сторонами.

Данная система является системой линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами.

На основании анализа полученных уравнений динамики кольца с непараллельными сторонами в работе сформулировано правило для вычисления собственных частот колебаний невращающегося кольца с непараллельными сторонами: для нахождения собственных частот колебаний кольца с непараллельными сторонами необходимо разложить функции, задающие изменение каждой из сторон кольца, в ряд Фурье в единой системе координат. Затем, вычислить величину, назовем ее эквивалентной шириной, равную разности постоянных коэффициентов разложения в ряд для верхней и нижней сторон кольца. Собственные частоты колебаний свободного кольца с непараллельными сторонами

определяем вычисляя собственные частоты кольца с параллельными сторонами, имеющего ширину, равную эквивалентной ширине.

Получены также уравнения динамики вращающегося на опорах кольца с переменным по периметру модулем упругости для случаев кольца с растяжимой и нерастяжимой средней линией. Модуль упругости задан выражением

$$E = E_0 + \sum_{i=1}^N [a_{Ei} \cos(i\theta) + b_{Ei} \sin(i\theta)].$$

Окончательные зависимости являются дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами.

Получены уравнения динамики обрабатываемого по мобильной технологии кольца с переменной по периметру кривизной средней линии. Рассматривались случаи кольца с растяжимой и нерастяжимой средней линией. Радиус кольца задан формулой

$$r = r_0 + A \cos(K\theta).$$

При получении уравнений динамики кольца с переменной кривизной считалось, что оно приводится во вращение роликом, вращающимся с постоянной угловой скоростью. В этом случае ось вращения кольца меняет свое положение в пространстве в зависимости от его формы и положения на опорах. Вследствие этого меняется во времени угловая скорость вращения кольца и момент инерции, что является существенным отличием этой задачи от рассмотренных в научной литературе. Доказанная выше теорема о характере прецессии гармоник стоячих волн справедлива при постоянной скорости вращения кольца и не может быть применима к кольцу с переменной скоростью вращения. Поэтому доказана вторая теорема о характере прецессии гармоник стоячих волн в кольце, вращающемся с переменной скоростью.

Теорема 2. При вращении на опорах кольца с переменной угловой скоростью прецессионное движение гармоник, возбужденных в кольце стоячих волн, происходит с угловой скоростью вращения кольца, т.е.

$$\dot{\varphi}_{uj} = \dot{\varphi}_{vj} = -\Omega_k(t) \quad (j = 1, 2, \dots, N).$$

Доказательство справедливо для колец, оболочек, описываемых линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями. При доказательстве использовался подход, применявшийся при доказательстве первой теоремы для линейных систем.

Формула кинетической энергии, в этом случае, имеет в вид

$$T = \frac{\rho S}{2} \int_0^{2\pi} r(\theta) \left[\left(\dot{V} + \Omega_K(t)U - \Omega_K(t)U_B(t, \theta) \right)^2 + \left(\dot{U} - \Omega_K(t)V + \Omega_K(t)V_B(t, \theta) \right)^2 \right] d\theta.$$

При получении переменных, фигурирующих в формуле кинетической энергии и ее производных, использовался итерационный метод определения положения кольца на опорах, скорости его вращения и линейной скорости его точек. Из полученной формулы для кинетической энергии, как частный случай, получается формула кинетической энергии для кольца постоянного радиуса.

Формула потенциальной энергии кольца имеет вид $\Pi = \Pi_p + \Pi_i$, где:

$$\Pi_p = \frac{EF}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{D} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{U}{R_K} \right)^2 R_K d\theta; \quad \Pi_i = \frac{EJ}{2} \int_0^{2\pi} \left[\frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{V}{R_K} - \frac{1}{D} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) \right]^2 R_K d\theta.$$

Здесь $D = \left| \frac{d\vec{r}}{d\theta} \right|$ - производная вектора \vec{r} по θ . Модуль вектора \vec{r} равен $r = r_0 + A \cos(K\theta)$; $D = \left| \sqrt{r'^2 + r^2} \right|$; R_K - текущий радиус кольца в точке θ ; $R_K = \frac{[\sqrt{r^2 + (r')^2}]^3}{r^2 + 2(r')^2 - r''}$; $r' = -AK \sin(K\theta)$; $r'' = -AK^2 \cos(K\theta)$.

Символ штрих означает производную по θ .

Окончательные уравнения динамики обрабатываемого по мобильной технологии кольца с переменной кривизной средней линии являются нелинейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. Получение решения их возможно только численными методами.

Получены дифференциальные уравнения динамики вращающегося на опорах упругого кольца с учетом динамики его углового движения и динамики задающего вращение двигателя. Принято, что кольцо постоянного радиуса вращается на двух опорах. Вращающий момент от двигателя на опоры передается через редуктор и упругую муфту. В этом случае для описания динамики кольца используются еще дополнительные переменные, задающие угловое положение и скорость вращения кольца на опорах, а также аналогичные характеристики для двигателя. Таким образом, угловая скорость вращения кольца и двигателя, а также их угловое положение определяются решением системы дифференциальных уравнения, описывающих поведение всей системы. Уравнения получены для кольца с растяжимой и нерастяжимой средней линией. Они являются существенно

нелинейными, с неопределенными множителями и решаются с условиями связи. В рассмотрен учет этих особенностей при получении решения численным методом.

В работе представлены результаты исследований свойств полученных математических моделей – первой, в которой угловая скорость вращения кольца задается постоянной величиной, и второй, в которой учитывается динамика вращательного движения кольца и его привода. Для получения решения этих систем использовался численный метод. Проведены исследования свободных колебаний кольца, влияния сил резания, исследовано влияние непостоянства ширины кольца на его динамику.

Полученные результаты расчетов показали, что расчеты по первой и второй моделям дают, примерно, одинаковые результаты при небольшой амплитуде колебаний в рассмотренном диапазоне толщин кольца и угловых скоростей вращения. Объясняется это слабым влиянием кориолисовых сил на динамику угловой скорости вращения кольца при малой амплитуде колебаний. С увеличением амплитуды радиальных колебаний кольца и скорости вращения разница при расчетах по разным моделям возрастает.

С помощью второй математической модели проведены исследования влияния коэффициента упругости станочного модуля и муфты на точность формообразования при разной скорости вращения кольца. Расчеты показали, что при некоторых значениях коэффициентов упругости станочного модуля и упругости муфты может возникнуть резонанс, который невозможно получить с использованием первой модели.

3. Математические модели динамики вращающейся на опорах оболочки

Получены результаты по разработке уравнений динамики вращающейся на опорах с постоянной скоростью оболочки с нерастяжимой срединной поверхностью, обрабатываемой по мобильной технологии.

При выводе уравнений приняты следующие допущения. Опорные ролики имеют форму цилиндра постоянного радиуса и погрешности их выставки можно задавать погрешностью выставки осей роликов. Оси вращения в возмущенном и невозмущенном движении оболочки совпадают. Рассматривается поведение тонкой оболочки, используя общепринятые гипотезы Кирхгофа - Лява. При получении уравнений с

использованием этих гипотез применялись зависимости полумоментной и моментной теории оболочек.

Кроме линейных пространственных перемещений U_0 , W , V точек отсчётной поверхности деформированной оболочки, задан угловой поворот образующей оболочки в плоскости, проходящей через радиус r_0 и ось оболочки Y . Такое задание деформации позволяет учесть различные перемещения точек оболочки при изменении координаты Y , а так же наличие опор. В этом случае радиальное перемещение U точки отсчётной поверхности, заданной координатами θ , Y , имеет вид $U=U_0 + +Y\gamma$, где γ задаёт линейную составляющую углового поворота образующей оболочки.

Величины перемещений точек отсчётной поверхности оболочки, с учетом нерастяжимости срединной поверхности, и угловой поворот образующей задан в виде рядов Фурье

$$U_0 = \sum_{i=1}^N [a_{ui} \cos(i(\Theta + \varphi_{ui})) + b_{ui} \sin(i(\Theta + \varphi_{ui}))],$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^N [a_{\gamma i} \cos(i(\Theta + \varphi_{\gamma i})) + b_{\gamma i} \sin(i(\Theta + \varphi_{\gamma i}))].$$

Функции φ_{ui} , $\varphi_{\gamma i}$ задают прецессию стоячей волны.

Используя условия связи между радиальным и тангенциальным перемещениями $V = - \int U d\theta$

для тангенциального перемещения получено $V = V_0 + Y\xi$,

$$\text{где } V_0 = \sum_{i=1}^N [(-a_{ui} i^{-1}) \sin(i(\Theta + \varphi_{ui})) + b_{ui} i^{-1} \cos(i(\Theta + \varphi_{ui}))],$$

$$\xi = \sum_{i=1}^N [-a_{\gamma i} i^{-1} \sin(i(\Theta + \varphi_{\gamma i})) + b_{\gamma i} i^{-1} \cos(i(\Theta + \varphi_{\gamma i}))].$$

Осевое перемещение точек оболочки задано зависимостью

$$W = \sum_{i=1}^N [a_{wi} \cos(i(\theta + \varphi_{wi})) + b_{wi} \sin(i(\theta + \varphi_{wi}))].$$

Кинетическую энергию вращающейся оболочки вычисляем по формуле

$$T_0 = \frac{\mu_0}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-a/2}^{a/2} [(\dot{V} + \Omega r_0 + \Omega U)^2 + (\dot{U} - \Omega V)^2 + \dot{W}^2] d\theta dY,$$

где: $\mu_0 = r_0 \rho_0 h$; r_0 – радиус оболочки; ρ_0 – удельная плотность материала; h – толщина оболочки; Ω – угловая скорость вращения оболочки на опорах.

Формулы потенциальной энергии оболочки учитывают гипотезы полумоментной и моментной теории оболочек.

Получены зависимости для обобщенных сил внутреннего трения, подчиняющегося закону Фойхта, в оболочке, учитывающие прецессию стоячих волн, а также для сил резания, гравитационных сил, действующих по обобщенным координатам. При выводе формул учтены погрешности выставки опорных роликов.

Получены также уравнения динамики оболочки при наличии точечных масс. Расчеты показали, что при некоторой угловой скорости вращения возникает резонанс.

4. Управление динамикой кольца в процессе обработки и идентификация его параметров

Проведены исследований по возможности управления динамикой вращающегося на опорах кольца, а также идентификации его геометрических и физических характеристик по данным измерений величины колебаний с целью повышения качества формообразования.

Рассмотрены три метода управления колебаниями кольца в процессе его обработки. Один позволяет управлять колебаниями двух составляющих первой гармоники вращающегося на опорах кольца по заданному закону $f_a(t), f_b(t)$ с использованием радиальной и тангенциальной сил. Для этого используется система дифференциальных уравнений, описывающих поведение гармоник кольца,

$$A_2 \ddot{q} + A_1 \dot{q} + A_0 q = P + R + M\lambda + DQ.$$

С ее использованием получены зависимости для определения вектора - функции управляющих сил Q , задающего требуемый закон изменения первой гармоники

$$Q = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{f}_a - W_1 \\ \dot{f}_b - W_2 \end{bmatrix}.$$

Условие управляемости по переменным a_{u1}, b_{u1} $\det \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \neq 0$.

Этот метод управления динамикой кольца обладает недостатком, заключающимся в том, что ведет к необходимости разработки технического устройства, развивающего большие импульсные силы.

Поэтому в работе рассмотрен другой метод, позволяющий управлять поведением кольца в точке, заданной угловой координатой в неподвижной системе координат. Считается, что в начальный момент времени имеется некоторое отклонение U_0 в этой точке от нулевого. Задан требуемый закон изменения положения кольца в этой точке $f_k(t)$. Тогда $f_k(t_0) = U_0$. Необходимо найти управляющие силы Q_R, Q_T ,

Используя дифференциальные уравнения поведения кольца, получены выражения для управляющих сил, обеспечивающих выполнение требуемого закона управления отклонением кольца в заданной точке.

Рассмотрен третий метод с более простым формированием управляющих сил, за счет использования релейного закона управления. Для этого используя, в общем случае нелинейную систему дифференциальных уравнений, описывающую поведение кольца, находим зависимости для определения управляющих сил, уменьшающих колебания в заданной точке θ_k вращающегося на опорах кольца. Закон управления выбираем релейный, управляющая сила должна быть направлена против скорости движения кольца в заданной точке, как действуют силы трения. Для осуществления этого закона необходимо знать радиальную скорость кольца в точке приложения силы. Осуществить это можно используя лазерные датчики.

Для управления динамикой кольца необходимо знать его физические и геометрические характеристики для использования в уравнениях динамики. В работе рассмотрена возможность идентификации характеристик кольца на основании обработки информации о установившихся радиальных колебаниях кольца при его вращении на опорах. Осуществлялась оценка, в связанной с кольцом системе координат, параметров функции, характеризующей реальные параметры кольца – модуль упругости, ширина, радиус, толщина и др. Для решения этой задачи неизвестная функция задана в виде ряда Фурье на интервале от нуля до 2π . В этом случае решение задачи сводится к оценке коэффициентов ряда Фурье по данным измерения. Рассмотрен пример оценки методом максимального правдоподобия действительной ширины кольца на основе измерений величины его радиальных колебаний при вращении.

Для получения математической модели этого вектора измерений использована математическая модель динамики вращающегося на опорах кольца с непараллельными сторонами. Ширина кольца задана формулой ряда Фурье, оценивались его коэффициенты. Исследовалось

влияние на точность оценки погрешности измерений и параметров измерений – числа, периодичности и т.д. Расчеты показали, что существующие измерительные средства и алгоритмы идентификации позволяют оценивать требуемые параметры кольца.

5. Основные результаты

Разработаны теоретические основы для исследования динамики вращающихся на опорах колец, оболочек, обрабатываемых с применением мобильной технологии. Созданы математические модели и комплекс программ для анализа влияния различных факторов на точность формообразования обрабатываемого тела при использовании мобильной технологии и для проектирования ее оборудования.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Предложен путь решения поставленной проблемы, позволяющий корректно учесть все особенности математических моделей, описывающих динамику вращающихся на опорах кольца, оболочки.

2. Доказаны теоремы о характере прецессионного движения возбужденных стоячих волн во вращающихся на опорах с постоянной и переменной угловой скоростью кольца, оболочке.

3. На основе принятых допущений, в классе нелинейных и линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, получены общие математические модели динамики вращающегося с постоянной угловой скоростью на двух опорах кольца с растяжимой и нерастяжимой средней линией, учитывающие прецессионное движение стоячих волн, действие внешних сил, в том числе сил резания, сил внутреннего трения, гравитационных.

4. Получены математические модели динамики вращающихся на опорах с постоянной угловой скоростью колец с растяжимой и нерастяжимой средней линией, имеющих следующие особенности: непараллельные стороны; переменный по периметру модуль упругости материала; изменяющуюся по периметру кривизну кольца. Получен метод вычисления собственных частот свободных кольца, оболочки с непараллельными сторонами. Получены уравнения динамики, в которых учтены динамика угловой скорости вращения кольца и его привода.

5. Получена математическая модель динамики вращающейся на опорах классической оболочки типа Кирхгофа – Лява с нерастяжимой срединной поверхностью, учитывающая действие внешних сил, в том

числе сил резания, гравитационных и сил внутреннего трения для случаев полумоментной и моментной гипотез.

6. Разработана математическая модель динамики вращающейся на опорах оболочки типа Кирхгофа – Лява с точечными массами.

7. На основе использования полученных уравнений вращающегося на опорах кольца рассмотрена задача управления его динамикой с целью уменьшения влияния на точность формообразования возмущающих сил. Предложен метод управления по заданному закону двумя гармониками колебаний кольца, радиальным перемещением, а также релейный метод управления радиальным перемещением в заданной точке.

8. Разработаны зависимости для оценки геометрических и физических параметров кольца, по данным измерений некоторой характеристики его колебаний, методом максимального правдоподобия.

9. Предложен метод получения численных значений элементов матриц линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих поведение систем, подчиняющихся вариационным принципам механики, не требующий получения аналитических выражений для элементов матриц. Расчеты, проведенные по разработанной автором программе, показали его хорошую точность. Метод позволяет существенно сократить время анализа динамики сложных систем.

10. На основе полученных математических моделей и расчетных алгоритмов разработан комплекс проблемно – ориентированных программ для решения различных задач динамики вращающегося на опорах кольца, а также для выбора наилучших режимов их обработки по мобильной технологии. Осуществлено сравнение точности различных моделей. Проведенные расчеты по реализации предложенных алгоритмов управления динамикой кольца показали возможность их применения для повышения точности формообразования. Проведены физические эксперименты для сравнения реальных процессов в системе с результатами расчетов по моделям. Определены значения параметров, при которых могут использоваться математические модели исходя из характеристик точности описания моделируемых процессов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08018 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Журавлёв В.Ф., Климов Д.М. Волновой твёрдотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 126 с.
2. Журавлёв В.Ф. Теоретические основы волнового твёрдотельного гироскопа (ВТГ) / Изв. РАН. МТТ. 1993. № 3. С. 8 – 17.
3. Егармин Н.Е. Нелинейные эффекты в динамике вращающегося кругового кольца / Изв. АН СССР. МТТ. 1993. № 3. С. 50 – 59.
4. Полунин А.И. Математическое моделирование динамики упругого вращающегося кольца при наличии двух опор / Изв. РАН. МТТ. 1999. № 6, С. 153 – 158.
5. Полунин А.И. Теоретические основы динамики крупного - баритного кольца при его обработке по мобильной технологии. Белгород: Изд-во БГТУ им. Шухова. 2015. 62 с.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ОКСИФЕНОЛЬНЫХ ОЛИГОМЕРОВ НА ПЛАСТИФИКАЦИЮ ЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЕЙ

val.po@bk.ru

Полуэктова В.А., канд. техн. наук, доц.,
Шаповалов Н.А., д-р техн. наук, проф.,
Старченко С.А., студент

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

Аннотация. Синтезирован ряд термопластичных олигомеров (новолаков) и терморезактивных олигомеров (резолов) на основе оксифенолов различной функциональности. Доказано, что пластифицирующей способностью обладают олигомеры на основе трифункциональных фенолов. Получены реологические характеристики цементных систем с резольными и наволочными олигомерами на основе трифункциональных оксифенолов. Дана сравнительная оценка пластифицирующих добавок на основе одно-, двух- и трёхатомных фенолов с известной пластифицирующей добавкой С-3. Доказано, что эффективными с точки зрения пластифицирующей способности являются терморезактивные олигомеры, при этом сильнее разжижают цементные системы оксифенолфурфурольные пластификаторы по сравнению с оксифенолформальдегидными. Наибольшей пластифицирующей активностью обладает добавка на основе флороглуцинфурфурольных олигомеров, что объясняется максимальным количеством оксигрупп в ароматических звеньях олигомерных молекул, которые участвуют в процессе адсорбции.

Ключевые слова: оксифенольные олигомеры, трифункциональные фенолы, терморезактивные олигомеры, пластификаторы, пластифицирующая способность, реологические свойства.

Анализ известных пластифицирующих добавок показал, что практически все они являются олигомерными электролитами на основе органических ароматических соединений. Широкое применение получили добавки на основе продуктов поликонденсации нафталина и его соединений. Наиболее используемым представителем этого класса был и остается разжижитель С-3, представляющий собой продукт

конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида, однако его производство и использование в последнее время столкнулось с рядом проблем. Поэтому работы в области синтеза пластифицирующих добавок, их изучения и применения остаются актуальными и относятся к междисциплинарным задачам [1-6].

Известно, что олигомеры бензольного, нафталинового и полиядерного ряда с различными гидрофильными полярными группами обладают пластифицирующей способностью. Ученые БГТУ им. В. Г. Шухова уже несколько десятилетий занимаются теорией и практикой синтеза пластифицирующих и суперпластифицирующих добавок для водных минеральных дисперсий, применяемых при производстве бетона и строительных изделий и конструкций на их основе [4-14]. Целью настоящей работы стало выявление фундаментальных закономерностей влияния пространственного строения оксифенольных олигомеров, природы мономерных звеньев и количества гидрофильных полярных групп в молекуле на пластифицирующую способность добавок.

Влияние пластифицирующих добавок на реологические свойства цементных смесей изучали на пастах ПЦ-500-Д0 Белгородского цементного завода с удельной поверхностью 354 м²/кг при постоянном водоцементном отношении равном 0,3. Исследования реологических параметров суспензий проводили с помощью ротационного вискозиметра «Реотест-2». Концентрацию добавок (C_m) рассчитывали в мас.% по сухому веществу от количества дисперсной фазы.

В качестве мономеров для синтеза пластификаторов использовали фенол и его производные (резорцин, пирокатехин, гидрохинон, флороглюцин, пирогаллол).

Известно, что в результате конденсационного взаимодействия фенола и его производных с альдегидами получают олигомеры и полимеры, строение которых зависит от функциональности фенола, вида альдегида, мольного соотношения реагентов, рН среды реакции. Так, меняя тип или функциональность исходных мономеров, либо условия синтеза, можно синтезировать линейные (возможны слабо разветвленные) термопластичные олигомеры (новолаки), либо сильно разветвленные терморезактивные олигомеры (резолы).

В фенолах реакционноспособными являются атомы водорода, находящиеся в орто- и пара-положениях к гидроксильной группе. Поэтому одноатомный фенол, двухатомный фенол (резорцин) и трехатомный фенол (флороглюцин) относятся к трифункциональным оксифенолам. К бифункциональным относятся оксифенолы с

гидроксогруппами в орто- или пара-положениях (пирокатехин и гидрохинон). К монофункциональным следует отнести 1,2,3-тригидроксобензол (пирогаллол).

Реакция поликонденсации бифункциональных соединений фенола приводила к образованию линейных полимеров, которые растворимы и не отверждаются при нагревании. Бифункциональные фенолы образуют только термопластичные олигомеры.

Реакцией конденсации трифункциональных фенолов (фенол, резорцин, флороглюцин) можно получить пространственные – сначала образуются плавкие и растворимые термореактивные олигомеры, которые при нагревании способны переходить в нерастворимые неплавкие полимерные молекулы с пространственным строением.

Из альдегидов лишь формальдегид и фурфурол способны образовывать термореактивные олигомеры при поликонденсации с трифункциональными фенолами. Другие альдегиды (уксусный, масляный и т. д.) вследствие пониженной химической активности и пространственных затруднений не образуют термореактивных олигомеров. При поликонденсации трифункциональных фенолов с формальдегидом и фурфуролом могут быть синтезированы как термопластичные, так и термореактивные олигомеры.

В зависимости от используемых мономеров разработаны различные технологии получения пластификаторов. 1) по известному поликонденсационному способу: сульфирование (для введения гидрофильных групп), поликонденсация фенола с формальдегидом в кислой среде (для получения олигомерных молекул) и нейтрализация [3]; 2) поликонденсация резорцина с формальдегидом и с фурфуролом в щелочной среде [4, 12,15]; 3) поликонденсация флороглюцина с фурфуролом в щелочной среде [1,4,15]; 4) поликонденсация пирокатехина с формальдегидом и с фурфуролом в щелочной среде; 5) поликонденсация гидрохинона с фурфуролом в щелочной среде.

Продукты синтеза на основе пирокатехина и гидрохинона обладали низкой пластифицирующей способностью, а олигомеры на основе пирогаллола вообще получить не удалось, что объясняется монофункциональностью данного оксифенола. В связи с этим дальнейших исследований с пирокатехином, гидрохиноном и пирогаллолом в данной работе не проводилось.

Исследования показали, что при поликонденсации оксифенолов с формальдегидом или фурфуролом могут быть синтезированы как термопластичные, так и термореактивные олигомеры.

Термопластичные (новолачные) олигомеры образуются в следующих случаях: при соотношении фенол : формальдегид 1 : 0,78-0,86 (избыток фенола) в кислой среде; при соотношении фенол : формальдегид 1 : 2-2,5 (большой избыток формальдегида в присутствии кислотных катализаторов (сильнокислая среда);

Термореактивные (резольные) олигомеры образуются в следующих случаях: при поликонденсации трифункционального фенола, взятого в избытке, с формальдегидом в щелочной среде (основные катализаторы); при количестве формальдегида, взятого в небольшом избытке, как в кислой, так и в щелочной средах.

Таким образом, получение термопластичных олигомеров, как правило, возможно в присутствии кислотных катализаторов, что вызывает необходимость нейтрализации продуктов реакции, для использования их в качестве пластифицирующих добавок для цементных систем. Синтез термореактивных олигомеров возможен только при поликонденсации трифункционального фенола и протекает при более мягких условиях в присутствии основных катализаторов.

В ходе данной работы был синтезирован ряд резольных и новолачных олигомеров на основе трифункциональных фенолов. В качестве мономеров для синтеза использовали фенол, резорцин и флороглюцин. Известно, что последние обладают большей реакционной способностью по сравнению с фенолом вследствие суммарного влияния двух (трёх) гидроксильных групп. В качестве конденсирующего агента использовали как широко применяемый для синтеза пластифицирующих добавок формальдегид, так и фурфурол. Для получения термопластичных или термореактивных олигомеров синтез вели соответственно в присутствии кислотных или основных катализаторов.

Изучение особенностей синтеза, установление состава и строения олигомеров проводили методами ИК-, ПМР-спектроскопии, жидкостной хроматографии и кондуктометрии [15]. Средний молекулярный вес синтезированных олигомеров определяли методом криоскопии. Результаты систематизированы и представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Пластификаторы на основе оксифенольных олигомеров

Обозначение модификата	Мономер	Технология получения	Структурная формула олигомеров	Моларный вес (г/моль)
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
СБ-Ф	фенол	1.Сульфирование; 2.Поликонденсация с формальдегидом в кислой среде; 3. Нейтрализация		1000
СБ-Р	резорцин	1.Поликонденсация с формальдегидом в щелочной среде		800
СБ-РФ	резорцин	1. Поликонденсация с фурфуролом в щелочной среде		800
СБ-ФФ	флороглюцин	1. Поликонденсация с фурфуролом		950

Молекулы СБ-Ф имеют линейное строение, т.е. представляют собой термопластичные олигомеры.

Молекулы СБ-Р, СБ-РФ, СБ-ФФ имеют пространственное строение. В процессе синтеза сначала образовывались плавкие и растворимые термореактивные олигомеры, которые при нагревании переходят в нерастворимые неплавкие полимерные молекулы с пространственным строением.

Далее исследовали пластифицирующую способность и реологические характеристики синтезированных олигомеров. При увеличении концентрации добавок значение предельного напряжения сдвига сначала резко уменьшалось, затем темп его снижения замедлялся, а при достижении оптимальной дозировки достигает практически нуля. Пластическая вязкость также вначале резко снижается, но затем достигает определенного минимального значения. В ходе исследований была проведена сравнительная характеристика с

известным отечественным аналогом – разжижителем С-3. Зависимости предельного динамического напряжения сдвига цементных суспензий от концентрации оксифенольных модификаторов представлены на рис. 1

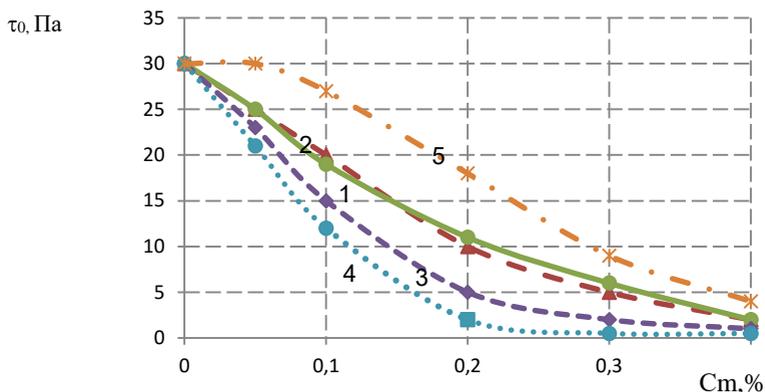


Рисунок 1 – Зависимость предельного напряжения сдвига цементных суспензий от концентрации добавок:
1 – СБ-Ф, 2 – СБ-Р, 3 – СБ-РФ, 4 – СБ-ФФ, 5 – С-3

Теоретические расчеты позволили объяснить уменьшение $[\tau]_0$ практически до нуля при оптимальных дозировках добавок падением прочности индивидуального контакта до значений, сравнимых с энергией теплового движения [1].

Проведенные исследования показали также уменьшение пластической вязкости, но лишь до определенных значений, оставаясь при дальнейшем увеличении концентраций модификаторов постоянной. Это связано в первую очередь с высвобождением иммобилизованной воды и увеличением, в связи с этим, относительного содержания дисперсионной среды. Увеличение толщины водных прослоек между частицами приводит к уменьшению трения между движущимися слоями и падению пластической вязкости. Это объясняет наблюдаемую пластификацию системы при введении синтезированных олигомеров и обусловлено модифицированием поверхности частиц дисперсной фазы адсорбированными олигомерами.

Наибольшей пластифицирующей активностью обладают термореактивные олигомеры, при этом сильнее разжижают дисперсные системы оксифенолфурфурольные пластификаторы по сравнению с оксифенолформальдегидными. Наибольшей пластифицирующей

активностью обладает добавка на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров, что объясняется максимальным количеством оксигрупп в ароматических звеньях олигомерных молекул, которые участвуют в процессе адсорбции.

Проведенные исследования доказали что, в результате конденсационного взаимодействия фенола и его производных с альдегидами получают олигомеры и полимеры, строение которых зависит от функциональности фенола и вида альдегида, а от строения получаемых олигомеров зависит пластифицирующая способность добавок. Масштаб проведенных исследований позволил получить фундаментальные закономерности влияния строения и состава оксифенольных олигомеров на пластификацию цементных смесей. Доказана возможность использования для цементных суспензий оксифенольных резолов на основе трифункциональных фенолов в качестве эффективных суперпластифицирующих добавок, не уступающих широко известному С-3.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08015 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Слюсарь А.А. Суперпластификатор на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров для водных минеральных суспензий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 108 с.
2. Samir Bouharoun, Yannick Vanhove, Chafika Djelal, Pascale De Caro, Isabelle Dubois, 2012. Interactions between Superplasticizer and Release Agents at the Concrete / Formwork Interface. Materials Sciences and Applications, 3: 384-389.
3. Шаповалов Н.А. Регулирование агрегативной устойчивости минеральных суспензий олигомерными ароматическими электролитами: Автореф. дис. докт. техн. наук. Белгород, 1999. 32 с.
4. Poluektova V.A., N.A. Shapovalov, M.M. Kosukhin and A.A. Slusar, 2014. Plasticizing Additives For Water Mineral Dispersions On The Basis Of Oxyphenol Oligomers. Advances in Natural and Applied Sciences, 8(5): 373-379.
5. Poluektova V.A., N.A. Shapovalov and A.I. Gorodov, 2015. Modifiers On The Base Of Oxyphenol Chemical Production Waste For The Industrial Mineral Suspensions. International journal of applied engineering research, 10(21): 42654-42657.

6. Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Балятинская Л.Н. Адсорбция оксифенолфурфурольных олигомеров на дисперсных материалах // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 11(6). С. 1470-1474.
7. Полуэктова В.А. Регулирование реологических свойств и агрегативной устойчивости водных минеральных суспензий суперпластификатором на основе флороглюцинофурфурольных олигомеров: дис. ... канд. техн. наук. Белгород. 2006.
8. Слюсарь А.А., Полуэктова В.А., Мухачева В.Д. Коллоидно-химические аспекты пластификации минеральных суспензий оксифенолфурфурольными олигомерами // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2008. №2. С. 66-69.
9. Шаповалов Н.А., Полуэктова В.А. Наномодификатор для цементных смесей и бетона // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. №5. С. 72-76.
10. Слюсарь А.А., Полуэктова В.А., Здоренко Н.М. Суперпластификатор СБ-ФФ как добавка для цементных и бетонных смесей // *Известия вузов. Строительство*. 2006. №10. С. 16-20.
11. Слюсарь А.А., Шаповалов Н.А., Полуэктова В.А. Регулирование реологических свойств цементных смесей и бетонов добавками на основе оксифенолфурфурольных олигомеров // *Строительные материалы*. 2008. №7. С. 42-43.
12. Полуэктова В.А., Столярова З.В., Ломаченко С.М., Черников Р.О. Адсорбция отечественного модификатора на основе отходов производства резорцина на поверхности минеральных частиц // *Міжнародний науковий журнал*. 2015. №4. С. 42-44.
13. Полуэктова В.А., Ломаченко В.А., Столярова З.В., Ломаченко С.М., Малиновкер В.М. Коллоидно-химические свойства водных дисперсий мела и мрамора // *Фундаментальные исследования*. 2014. №9 (6). С. 1205-1209.
14. Poluektova V.A., Makushchenko I.S., Chernikov R.O. Comparative analysis of the effectiveness hyper - and superplasticizers in mineral suspensions / *Science, Technology and Higher Education : materials of the IX International research and practice conference, Westwood, December 23-24, 2015 / publishing office Accent Graphics communications – Westwood – Canada, 2015. – pp. 185-192.*
15. Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Балятинская Л.Н. Синтез и строение суперпластификаторов на основе оксифенольных олигомеров // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 11 (6). С. 1136-1141.

ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ-ГЕКСАПОДОМ ДЛЯ ПОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ

rl_bgtu@intbel.ru

**Рыбак Л.А., д-р. техн. наук, проф.,
Гапоненко Е.В., канд. техн. наук, доц.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В статье приводится алгоритм управления движением робота-гексапода при 3D-печати различных изделий, а также основные проблемы, возникающие при разработке данного алгоритма. Приводится описание робота-гексапода для 3D-печати различных изделий. Подробно рассмотрены печатающая головка и блок управления подачей печатающего материала, входящие в состав данного робота. В статье приведены основные принципы работы с разработанным программным модулем и идет ознакомление с программным интерфейсом. Описывается подробный выбор настроек 3D-печати в разработанном программном модуле таких как, высота слоя, вид заполнения модели печатающим материалом, печать поддержек и т.д. Приводятся рекомендации по оптимальному выбору данных настроек для достижения необходимого качества получаемых моделей изделий.

Ключевые слова: алгоритм, робот-гексапод, моделирование, 3D-печать, контроллер, программный модуль, экструдер.

Технологии создания робототехнических комплексов для систем быстрого прототипирования появились в Японии и США в конце 1980-х – начале 1990-х годов. Быстрое прототипирование определяется как аддитивный процесс изготовления трехмерного объекта с помощью последовательного нанесения слоев материала. Многие системы быстрого прототипирования называют 3D-принтерами, которые используют различные типы материалов и аддитивных технологий, в частности полномасштабные строительные технологии для «печати» зданий и строительных блоков [1]. В настоящее время активно исследуется изготовление строительных конструкций с применением технологий 3D-печати для создания баз на Луне и иных космических объектах [2]. Например, использование реголита, распространенного на Луне, рассмотрено в статьях [3, 4]. В этих работах исследуется

изготовление конструкций сложной формы из специальных строительных материалов с помощью неподвижной портальной конструкции. Похожую конструкцию и метод работы имеет российская разработка компании ЗАО «Спецавиа» [5]. Эта компания с 2015 года серийно выпускает строительные 3D-принтеры различных модификаций. Например, принтер S-1160 с рабочей зоной 10 x11x2,7 м может печатать строительные конструкции и сооружения стандартными составами на основе цемента марки 500, т.е. тем, что есть в свободной продаже на любом строительном рынке. Имеется возможность применять смеси с минеральными добавками и фиброволокном. Размер печатаемого слоя составляет 10 x 30 мм, скорость печати 9 м/мин. Основным недостатком предложенных решений является ограниченная высота конструкций до 2,7 м для самого большого из принтеров, а также то, что точность представлена для перемещения механизмов, а не конечного рабочего органа.

Важное значение имеет разработка программного обеспечения для функционирования робототехнических комплексов, осуществляющих печать [6,7]. Поставлена задача создания алгоритмов, позволяющих универсализировать каждую из управляющих программ для выполнения сходных технологических задач, с возможностью удобной перенастройки в зависимости от исходных данных и необходимых траекторий движения выходного звена.

Рассмотрим робот-гексапод (рис.1), содержащий блок управления подачей печатающего материала и печатающую головку.



Рисунок 1 – Робот-гексапод для 3D-печати изделий

Робот-гексапод имеет шесть степеней свободы выходного звена, высокую точность позиционирования $\pm 0,1$ мм, грузоподъемность до 190 кг. Данная шестистержневая конструкция с параллельной кинематикой обеспечивает роботу необходимую жесткость при выполнении различных операций, требующих приложения силы, а также достаточно большую рабочую зону в пределах 1040 мм.

Блок управления подачей печатающего материала (рис.2) состоит из следующих основных компонентов: 1 – корпус блока управления подачей пластика; 2 – экран; 3 – ручка управления; 4 – разъем RJ1; 5 – разъем RJ2.

Печатающая головка (рис. 3) крепится к выходной платформе робота-гексапода и в зависимости от конфигурации строительного изделия, а также требований, предъявляемых к нему, может быть оснащена соплами различного диаметра, что позволяет повысить скорость печати за счет толщины печатаемого слоя. В состав печатающей головки входят: 1 – корпус печатающей головки; 2 – вентилятор 40x40x10; 3 – двигатель подачи печатающего материала; 4 – блок нагрева печатающего материала; 5 – сопло 0,8мм; 6 – механизм подачи печатающего материала; 7 – радиатор; 8 – вентилятор 40x40x20.

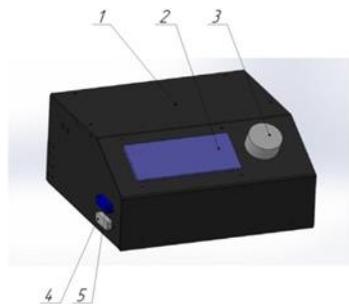


Рисунок 2 – Блок управления подачей печатающего материала

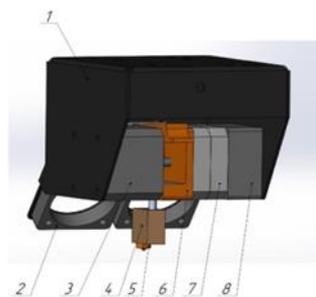


Рисунок 3 – Печатающая головка

Блок управления подачей печатающего материала и робот-гексапод взаимодействуют следующим образом. В ходе работы посредством дискретных входов/выходов между блоком управления и контроллером робота происходит обмен информацией. Для каждого сигнала существует гальваническая развязка в виде оптопар РС817 для обеспечения безопасной работы и быстрого действия.

На рис. 4 приведен алгоритм управления движением робота-гексапода и подачи материала в печатающую головку при 3D-печати

строительных изделий. Сигнал с контроллера Arduino MEGA 2560 1, платформа которого содержит 54 цифровых входов/выходов, поступает на плату расширения 2. Плата расширения Ramps 1.4 полностью совместима с контроллером Arduino MEGA 2560 и позволяет собрать полноценный контроллер 3D-принтера. На плате так же имеются входы обратной связи от конечных выключателей, ограничивающих перемещение по осям и вход термометра экструдера. На плате дополнительно установлены разъемы для подключения карты памяти типа SD и дисплея. На плату расширения устанавливается драйвер двигателя Polulu A4988 3, который управляет шаговым двигателем 4. В качестве шагового двигателя используется двигатель модели Nema 17, это самый оптимальный вариант по мощности и стоимости, а также данный шаговый двигатель широко зарекомендовал себя при конструировании 3D-принтеров. Также, с платы расширения подается напряжение 12В на нагреватель 5, а с учетом того, что контроллер поддерживает широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), то появляется возможность управления скоростью вентилятора. Вентилятор на 3D-принтере может быть постоянно включенным на маленькой скорости, начиная со второго слоя, потом увеличивается скорость обдува при печати маленьких слоев. Нагреватель производит нагрев печатающего материала до необходимой температуры. В качестве объекта управления в нашем случае используется сопло 6, которое может иметь различный диаметр. Для измерения температуры экструдера и платформы в конструкции используется термодатчик T3650 7 номиналом 100кОм. Термодатчик связан с контроллером и является очень важной частью конструкции, так как разные виды материала требуют определённых температур и их нужно постоянно контролировать.

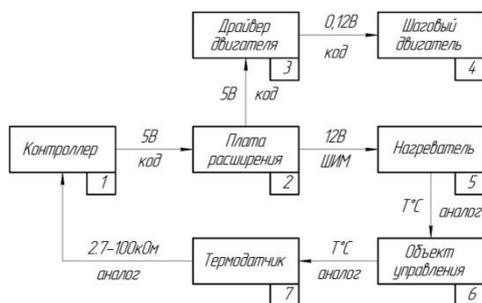


Рисунок 4 – Алгоритм управления движением робота-гексапода и подачи материала в печатающую головку при 3D-печати изделий

Чтобы начать 3D-печать изделий на роботе необходима 3D-модель в формате .stl, которую нужно преобразовать в G-код. В нашем случае для создания 3D-моделей использовался программный комплекс Solidworks, в котором проектировались 3D-модели строительных изделий различной сложности. Программное обеспечение, которое отвечает за преобразование объемной модели в G-код, называется «слайсером». На рисунках 5 и 6 показаны рабочее поле программы “Slicer”, куда добавлена пробная 3D-модель, и панель настроек печати (“Print Settings”).

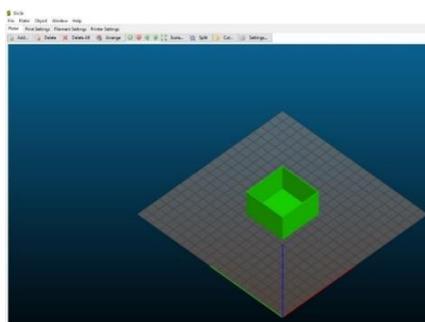


Рисунок 5 – Рабочее поле программы Slicer

Slicer позволяет перед печатью посмотреть, как размещена модель на столе, нужны ли поддержки и выбрать все нужные параметры, в том числе скорость печати, толщину слоя, процент заполнения и т.д. Экспериментируя с настройками слайсера, можно добиться отличного качества для печати разного типа моделей. Модель режется (слайсится)

) по слоям. Каждый слой состоит из периметра и/или заливки. Модель может иметь разный процент заполнения заливкой, также заливки может и не быть (пустотелая модель). На каждом слое происходят перемещения по осям XY с нанесением расплава печатающего материала. После печати одного слоя происходит перемещение по оси Z на слой выше, печатается следующий слой и так далее.

Одним из самых важных параметров, влияющих на качество печати является высота слоя (Layer height). При установке высоты слоя необходимо опираться на геометрию печатаемой модели и за какое время ее необходимо напечатать. При меньших параметрах печать будет осуществляться гораздо дольше. Главное правило при выставлении этого параметра: он не может превышать толщину используемого сопла. Поле *Perimeters* устанавливает количество слоев контура модели (или количество слоев стенки модели). Чем меньше число, тем меньше толщина стенки модели, а значит, модель будет более хрупкая. Минимально – 1, оптимально – 3-4 шт.

Вторым важным параметром настроек печати является вкладка заполнение (“Infill”). Заполнение - это заливка пустого пространства внутри модели. Чем выше процент заполнения, тем крепче получается модель, но печатается при этом гораздо дольше, поэтому значение поля зависит от требований, предъявляемых к строительным изделиям. В программе можно выбрать различные виды заполнения модели печатающим материалом (рис. 7).

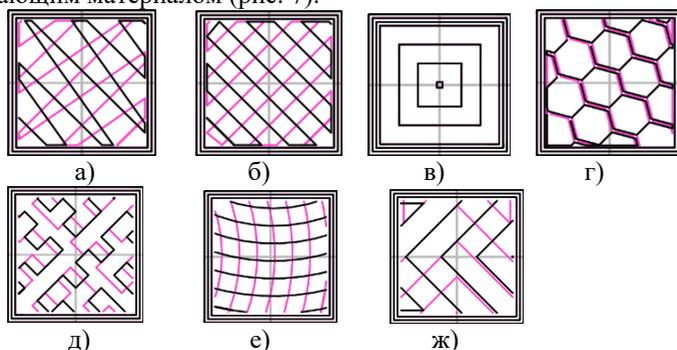


Рисунок 7 – Виды заполнения модели печатающим материалом:

- а) Линейное (Line); б) Прямолинейное (Rectilinear); в) Концентрическое (Concentric); г) «Медовые соты» (Honeycomb); д) Кривая Гильберта (Hilbert Curve); е) Хорды Архимеда (Archimedean Chords); ж) Спиральная октаграмма (Octagram Spiral)

Для каждого вида заполнения модели печатающим материалом можно выбрать процент заполнения в поле *Fill density*. Значения, вводимые в поле должны быть в пределах от 0 (без заполнения) до 0,99 (полное заполнение). Самым оптимальным из видов заполнения модели печатающим материалом считается *honeycomb* («медовые соты»). 3D-модели, полученные данным видом заполнения имеют небольшой вес и оптимальную прочность. В целях экономии материала можно воспользоваться параметром *Infill every*. Данный параметр определяет на каких слоях будет происходить заливка.

Еще одним важным параметром настроек являются поддержки («Support material»). Печать поддержек необходима для моделей с сильно выступающими или висящими в воздухе элементами. Печать поддержек можно включить в поле *Generate support material*. Поддержки бывают всего трех видов: прямолинейная (*Rectilinear*); прямолинейная сетка (*Rectilinear Grid*); «медовые соты» (*Honeycomb*) (рис.8). Вид поддержки выбирается в поле *Pattern*.

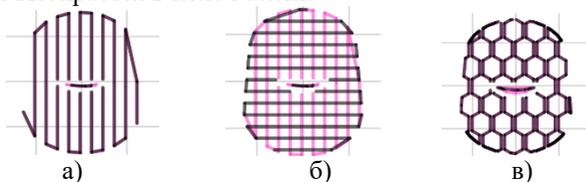


Рисунок 8 – Виды поддержек:

а) прямолинейная (*Rectilinear*); б) прямолинейная сетка (*Rectilinear Grid*); в) «Медовые соты» (*Honeycomb*).

Очень важным параметром при 3D-печати является скорость. В программе *Slicer* скорость печати выбираем в поле “*Speed*”. Для каждого печатаемого изделия необходимо выбирать оптимальную скорость печати, так как при увеличении скорости печати ухудшается качество модели. Отдельно можно выбрать скорость печати контура модели в поле *Perimeters*, скорость печати выбранного вида заполнения в поле *Infill*.

Следующей основным параметром настроек при 3D-печати является вкладка “*Skirt and brim*” («Юбка» и края). Параметром *Loops* регулируется количество окантовок вокруг моделей (петель). Печать окантовок позволяет увидеть, насколько хорошо откалиброван стол или поверхность в месте размещения объекта. Минимальное количество печатающего материала в мм, которое будет потрачено на печать окантовки выбирается параметром *Minimum extrusion length*. Параметр *Brim width* регулирует ширину «юбки» вокруг модели. Необходимо

учитывать, что данный параметр должен быть меньше значения, вводимого в поле *Distance from object*.

Также, среди настроек печати во вкладке “Advanced” можно выбирать опции для печатающего материала. Например, параметр *Default extrusion width* регулирует количество выдавливаемого печатающего материала в мм. Если установлен “0”, то программа автоматически настраивает этот параметр в зависимости от модели. Параметр *First layer* обозначает количество выдавливаемого печатающего материала для первого слоя в мм.

Перед началом 3D-печати необходимо выставить температурные режимы нагрева печатающего материала, а также в зависимости от использованного материала и его охлаждения. В поле *Diameter* выбираем диаметр сопла в мм, а в поле *Extrusion multiplier* – количество подаваемого печатающего материала в мм. В поле “Cooling” (“Охлаждение”) выбираем параметры охлаждения для некоторых видов печатающих материалов. В поле *Keep fan always on* можно выбрать постоянную работу вентилятора. Параметр *Fan speed* определяет минимальную скорость обдува (Min) и максимальную (Max). После того как выбраны все основные настройки 3D-печати можно открыть предварительный просмотр печатаемого изделия со всеми поддержками, «юбками», мостами и т.д. (рис. 9). А также, можно наглядно увидеть выбранный вариант заполнения изделия печатающим материалом (рис.10).

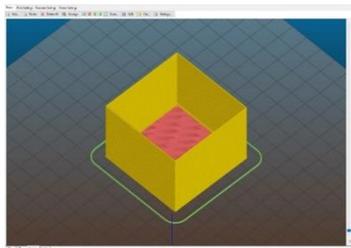


Рисунок 9 – Предварительный просмотр печатаемого изделия в программе Slice

Также, нужно обратить внимание, что перед первым использованием данного робота для 3D-печати изделий во вкладке “Printer Settings” (“Настройки принтера”) необходимо один раз выставить следующие настройки принтера:

- а) *Bed size* – размер стола или рабочей поверхности в мм;
- б) *Print center* – центр печати;

- в) *Extruders* – количество экструдеров;
- з) *Vibration limit* – лимит по вибрации в Герцах.

При каждой смене сопла необходимо проверить и при необходимости изменить следующие настройки:

- а) *Nozzle diameter* – диаметр сопла, мм.;
- б) *Extruder offset* – смещение экструдера по осям X и Y (актуально только для принтеров с несколькими экструдерами);
- в) *Lift Z* – приподнимание сопла на определенное количество мм. при смене слоев;
- з) *Speed* – скорость ретракции;

В результате выполнения поставленной задачи были разработаны и реализованы алгоритмы в составе управляющих программ, позволяющие универсализировать их для выполнения 3D-печати изделий. Программа управления на основе данного алгоритма более простая, а также универсальная, что позволяет применять ее ко всей серии роботов с подобным контроллером. В результате разработан робот-гексапод для 3D-печати изделий различных размеров при помощи выходного сопла, которое производит распыление рабочего вещества, а также приводятся основные настройки 3D-печати, с правильным выбором которых можно достичь необходимого качества получаемых моделей изделий.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08058 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Gardiner J., 2009, Sustainability and Construction Scale Rapid Manufacturing: a Future for Architecture and the Building Industry, Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) - 14th May Conference at Rapid 2009 Exhibition, Chicago – Illinois.
2. Exploration colonization resource extraction and utilization of Moon and Mars (ECROMM), in: Proceedings of the 62nd International Astronautical Congress IAC, Cape Town. Raval . 2011. 7845-51.
3. Cesaretti, Giovanni, Enrico Dini, Xavier de Kestelier, Valentina Colla, Laurent Pambaguian (January 2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. Acta Astronautica 93:430-50. doi:10.1016/j.actaastro.2013.07.034;
4. Ceccanti F., Dini E., De Kestelier X., Colla V., Pambaguian L. 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil. 61st International

- Astronautical Congress, Prague ,2010, 9 p. и Goulas A., Friel R. J. 3d PrintingwithMoondust. RapidPrototypingJournal. 09/2016; 22(5)
5. Строительные 3D принтеры. URL: <http://specavia.pro/catalog/stroitelnye-3d-printery/>
 6. Bazhanov A., Yudin D, Porkhalo V., Karikov E. Contrpl system of robotic complex for constructions and buildings printings. IDT 2016 - Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies 2016 2016. С. 23-31.
 7. Рыбак Л.А. Программный модуль для реализации заданной траектории движения выходного звена робота-гексапода для 3D печати изделий / Рыбак Л.А., Мамаев Ю.А., Малышев Д.И., Вирабян Л.Г. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 155-164.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКТИВНЫХ МОДИФИЦИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ЭПИКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ

vvstrokova@gmail.com

Строкова В.В., д-р техн. наук, проф.,
Огурцова Ю.Н., канд. техн. наук,
Боцман Л.Н., канд. техн. наук, доц.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В статье рассмотрены аспекты проектирования активных модифицирующих компонентов на основе сырья различного генетического типа и строительных композитов с их использованием. Рассмотрен механизм эпикристаллизационного модифицирования кристаллической матрицы конструкционно-теплоизоляционных бетонов и мелкозернистых бетонов с пониженным водопоглощением и высолообразованием при использовании активных гранулированных компонентов различного состава.

Ключевые слова: эпикристаллизационное модифицирование, кремнеземное сырье, гранулированный наполнитель, кристаллическая матрица, теплопроводность, водопоглощение, гидрофобизация.

При проектировании композиционных материалов с целью достижения требуемых характеристик и обеспечения возможности их прогнозирования исследователи рассматривают первоначально характеристики отдельных систем, а затем особенности их взаимодействия [1–5]. Этот подход применялся и при проектировании активного гранулированного наполнителя на основе кремнеземного сырья и композитов с его использованием. С учетом многокомпонентности системы использован дифференцированный поэтапный подход к исследованию объектов в следующей системе «кремнеземное сырье – активный гранулированный компонент – кристаллическая матрица композиционного материала».

Направляющими в данном исследовании были приняты следующие подходы, нашедшие в том числе и широкое применение за рубежом [6–10]:

- использование нетрадиционного сырья и отходов промышленности, в том числе в качестве заполнителей, для модификации процессов структурообразования и свойств кристаллической матрицы композитов;
- использование принципа щелочной активации силикатного и алюмосиликатного сырья при синтезе композитов;
- инкапсуляция активных агентов в защитные оболочки и исследование их взаимодействия с кристаллической матрицей;
- разработка научных подходов повышения водостойкости цементной матрицы при использовании модифицирующих силикатных систем.

На первом этапе реализован комплексный теоретический и экспериментальный анализ природного и техногенного сырья различного генетического типа по следующим признакам: генетический тип пород, территориальное расположение месторождений или отвалов, объем разведанных запасов или объем производства, области применения, химический состав, минеральный состав, степень аморфизации. Это позволило разработать классификацию и провести ранжирование сырья для реализации эпикристаллизационного модифицирования (рис. 1).

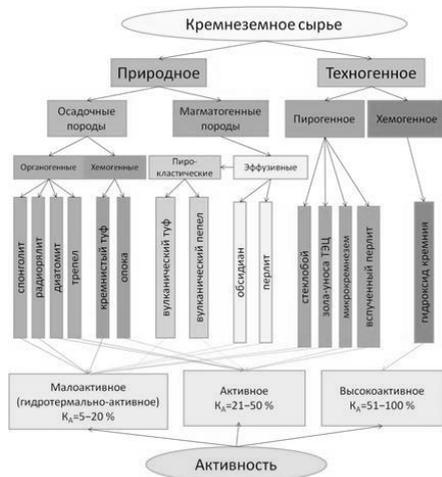


Рисунок 1 – Классификация природного и техногенного сырья, как компонента систем эпикристаллизационного модифицирования

С учетом уникальности предлагаемого способа модифицирования кристаллической матрицы разработаны критерии оценки кремнеземного сырья, учитывающие взаимосвязь между генетическим типом сырья, содержанием щелочного активатора и свойствами синтезируемого раствора (табл. 1), а также его влиянием на структурообразование и характеристики кристаллической матрицы. Для установления оптимальных условий

функционирования активного компонента проводилось экспериментальное определение влияния температуры и времени тепловлажностной обработки на степень взаимодействия компонентов его ядра и свойства формируемого раствора.

Таблица 1 – Зависимости количества прореагировавшего вещества и силикатного модуля растворов полисиликатов натрия от содержания щелочи

Кремнеземное сырье	Количество прореагировавшего вещества, %						
	Силикатный модуль						
	Содержание щелочи, %						
	10	15	20	25	30	35	40
Кремневая кислота	<u>20</u> 3,24	<u>32</u> 3,36	<u>43</u> 3,53	<u>60</u> 3,90	<u>75</u> 4,11	<u>81</u> 3,78	<u>87</u> 3,50
Опока	<u>16</u> 3,48	<u>23</u> 3,31	<u>29</u> 3,11	<u>33</u> 2,91	<u>40</u> 2,92	<u>42</u> 2,68	<u>46</u> 2,50
Трепел	<u>10</u> 2,14	<u>11</u> 1,57	<u>12</u> 1,36	<u>12</u> 1,06	<u>12</u> 0,87	<u>12</u> 0,75	<u>12</u> 0,66

На втором этапе исследования осуществлялась разработка и исследование свойств активного модифицирующего компонента. Для установления условий получения активированных функциональных систем с требуемым силикатным модулем и в максимально возможном количестве использовались следующие подходы: применение сырья различного генетического типа; определение зависимости активности кремнеземного сырья от времени помола путем определения коэффициента активности, согласно разработанному ранее экспресс-методу, и сорбционной способности кремнеземных компонентов по отношению к гидроксиду кальция; определение зависимости радиуса и степени пропитки кристаллической матрицы от размера и содержания гранул активного компонента; определение характера новообразований в цементной системе при варьировании содержания щелочи; определение зависимости гранулометрического состава и физико-механических показателей активного компонента от вида материала оболочки.

На третьем этапе реализовано исследование влияния вышеуказанных факторов на эффективность эпикристаллизационного модифицирования строительных композитов. На основе результатов оценки влияния состава и свойств активного компонента на структурообразование строительных композитов с учетом генетических особенностей кремнеземного сырья [11, 12] разработаны

конструкционно-теплоизоляционные и мелкозернистые бетоны с пониженным водопоглощением (табл. 2).

Таблица 2 – Характеристики изделий с активным гранулированным компонентом

Наименование	Ед. изм.	Показатели
Прочность на сжатие	МПа	15–50
Средняя плотность	кг/м ³	1200–2400
Водопоглощение	%	1,5–12
Морозостойкость	циклов	50–200
Теплопроводность	Вт/мК	0,11–0,37

При использовании разработанного активного гранулированного компонента осуществляется обеспечение пролонгированного модифицирования кристаллической матрицы, т.е. функционирование активного компонента начинается не сразу после введения в смесь, а во время и после тепловлажностной обработки материала, т.е. через определенный промежуток времени, который может регулироваться. При этом теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования активного модифицирующего компонента как носителя химических добавок для реализации их управляемого транспорта в толщу кристаллической матрицы с целью исключения формирования гидрофобных адсорбционных оболочек на поверхности цементных частиц (рис. 2).

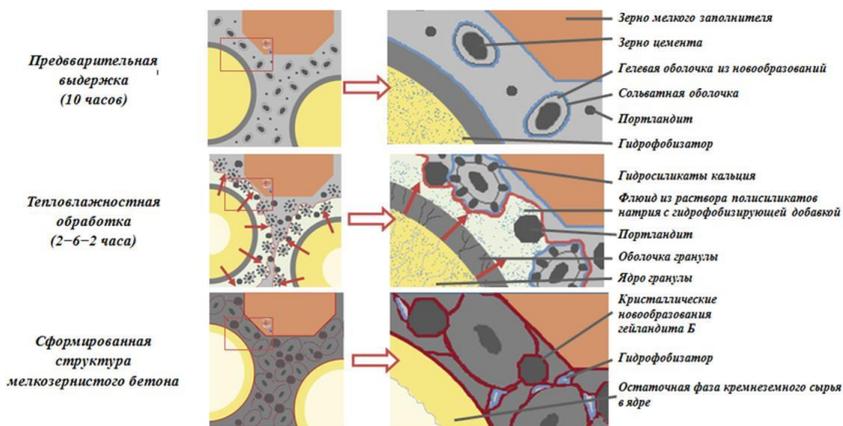


Рисунок 2 – Механизм взаимодействия компонентов в системе «мелкозернистый бетон – активный компонент с гидрофобизирующей добавкой»

Во время ТВО изделий из бетона с использованием активного компонента отмечается активное взаимодействие в ядре между кремнеземной породой и гидроксидом натрия с образованием водорастворимых силикатов натрия. Из ядра выщелачивается аморфный кремнезем, и в результате на месте активного компонента остаются пустоты, наполненные малоактивными кристаллическими частицами. Мигрируя через трещины защитной оболочки гранул, силикаты натрия пропитывают цементно-песчаную матрицу изделия. Данный процесс ведет к формированию малорастворимых соединений на основе силикатов натрия, на поверхности порового пространства бетона, исправлению («залечиванию») дефектов в структуре цементно-песчаной матрицы, заполнению микро- и наноразмерных пор цементного камня, что способствует формированию монолитной контактной зоны между заполнителем и бетонной матрицей, препятствует процессам миграции воды, повышая тем самым водонепроницаемость строительного изделия в целом и позволяет сохранять низкие показатели теплопроводности во влажных условиях.

Таким образом может быть реализована возможность последовательной направленной гетерогенизации объема композита при получении конструкционно-теплоизоляционных бетонов. Использование активного компонента в легких бетонах в качестве альтернативы керамзитовому граввию, также обусловлено их

способностью к активному химическому взаимодействию с цементной матрицей, повышению ее водостойкости, прочностных характеристик и снижению теплопроводности композита в целом. Это достигается за счет воздействия образующегося в ядре активного компонента, во время тепловлажностной обработки, раствора полисиликатов натрия на цементно-песчаную матрицу бетона и формирования плотной контактной зоны.

Разработанные активные компоненты и композиты с их использованием по эксплуатационным характеристикам соответствуют мировым аналогам, что подтверждает эффективность предложенных принципов эпоксидно-кристаллизационного модифицирования.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08024 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Павленко Н.В., Жерновский И.В. Строительные композиты с применением наноструктурированного вяжущего на основе сырья различных генетических типов // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 11–15.
2. Лесовик В.С., Володченко А.А. К проблеме техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 38–41.
3. Нелюбова В.В., Кобзев В.А., Сивальнева М.Н., Подгорный И.И., Пальшина Ю.В. Особенности наноструктурированного вяжущего в зависимости от генезиса сырья // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 25–29.
4. Жерновский И.В., Кожухова Н.И. Механоактивационное управление активностью кремнеземного сырья различного генезиса // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 4 (183). С. 52–53.
5. Cherevatova A.V., Zhernovskii I.V., Nelyubova V.V. Evaluation Of The Phase And Dimensional Heterogeneity Of The Quartz Component Of Raw Material And HCBS // Refractories and Industrial Ceramics. 2010. T. 51. № 4. С. 310–311.
6. Song Z., Xue X., Li Y., Yang J., He Z., Shen S., Jiang L., Zhang W., Xu L., Zhang H., Qu J., Ji W., Zhang T., Huo L., Wang B., Lin X., Zhang N. Experimental exploration of the waterproofing mechanism of inorganic sodium silicate-based concrete sealers // Construction and Building

- Materials. 2016. Vol.104. Pp. 276–283.
7. Haq E.U., Padmanabhan S.K., Karim M.R.A., Licciulli A. Setting and curing of mortars obtained by alkali activation and inorganic polymerization from sodium silicate and silica aggregate // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. Pp. 291–296.
 8. Zhang N., Li H., Zhao Y., Liu X. Hydration characteristics and environmental friendly performance of a cementitious material composed of calcium silicate slag // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. Vol. 306. Pp. 67–76.
 9. Peng X., Zhou Y., Jia R., Wang W., Wu Y. Preparation of non-sintered lightweight aggregates from dredged sediments and modification of their properties // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 132. Pp. 9–20.
 10. Aguirre-Guerrero A.M., Robayo-Salazar R.A., Gutiérrez R.M. A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion // *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 135. Pp. 437–446.
 11. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Осадчий Е.Г., Подгорный И.И., Шаповалов Н.А. Механоактивация как способ управления процессами структурообразования автоклавных материалов на различных уровнях организации // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. № 3. С. 7–9.
 12. Кожухова Н.И., Жерновский И.В., Фомина Е.В. Фазообразование в геополлимерных системах на основе золы-уноса апатитской ТЭЦ // *Строительные материалы*. 2015. № 12. С. 85–88.

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО – И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ
ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗО-
ОКСИДНЫХ ПИГМЕНТИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ
МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ОСНОВАННОЙ НА
МЕХАНИЧЕСКОЙ, ТЕРМИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-
ХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ
ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

taga307@yandex.ru

**Тарасова Г.И., д-р техн. наук, доц.,
Свергузова С.В., д-р техн. наук, проф.,
Старостина И.В., канд. техн. наук, доц.,
Уральский В.И., канд. техн., наук, доц.,
Севостьянов М.В., канд. техн. наук, доц.**

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

Аннотация. Представлена теоретическая концепция по утилизации металлосодержащих отходов – хвостов обогащения железистых кварцитов (ХОЖК). Разработаны новые теоретические положения механизма формирования на кварцевой основе адгезионно прочной хромофорной пленки Fe_2O_3 . Математические модели процессов переработки отходов обогащения железорудного сырья Гоков посредством их механоактивации и гомогенизации. Разработана технологическая схема с подобранным энергосберегающим оборудованием по получению синтетических железоксидных пигментированных материалов на основе техногенного сырья, представленного гомогенизированными механоактивированными отходами горно-обогатительных предприятий металлургического комплекса Белгородской области.

Ключевые слова: хвостохранилища ГОК, ХОЖК, термообработка, железоксидные пигменты - наполнители, диспергирование, кладочные растворы, композиционные полимерные материалы.

В результате выполнения работ по проекту были решены следующие задачи: 1) проведен анализ отходов обогащения железорудного сырья горно-обогатительных предприятий металлургического комплекса Белгородской области как техногенной сырьевой

базы для получения пигментированных материалов широкого спектра использования; 2) комплексное исследование основных химических, физических и механических свойств отходов магнитной сепарации различных горно-обогатительных комбинатов Белгородской области как потенциального минерального сырья для получения железоксидных пигментированных материалов многофункционального назначения; 3) разработаны новые составы сырьевой шихты за счет использования твердых минеральных отходов горно-обогатительных предприятий металлургического комплекса в качестве минерального сырья для получения синтетических железоксидных пигментированных материалов различной цветовой гаммы; 4) разработаны новые теоретические положения механизма формирования на кварцевой основе адгезионно прочной хромофорной пленки Fe_2O_3 . Математические модели процессов переработки отходов обогащения железорудного сырья посредством их механоактивации и гомогенизации. Разработана технологическая схема с подобранным энергосберегающим оборудованием по получению синтетических железоксидных пигментированных материалов на основе техногенного сырья, представленного гомогенизированными механоактивированными отходами горно-обогатительных предприятий металлургического комплекса Белгородской области; 5) разработаны основы физико-химических и технологических условий получения на основе ХОЖК: композиционных вяжущих, кладочных растворов, сухих смесей для устройства полов, сухих смесей для ремонтных и восстановительных работ. Разработаны оптимальные составы смесей и получение уравнений регрессии, адекватно описывающих влияние технологических условий производства и компонентов состава проектируемых смесей на их потребительские свойства. Разработаны математические модели и алгоритмы для проектирования технологических комплексов, модулей и агрегатов различного вариативного исполнения.

В современных условиях в связи с ростом потребления продукции минерально-сырьевого комплекса происходит истощение крупных запасов полезного ископаемого, ухудшается состояние окружающей среды и возникает настоятельная необходимость вовлечения в разработку техногенных месторождений. Техногенные месторождения становятся все более важными источниками различных видов минерального сырья. Накопление отходов горно-металлургического производства в техногенных объектах осуществляется непрерывно. Суммарное содержание компонентов оксидов железа и кремния,

накапливающихся за 20 - 30 лет на техногенных объектах сопоставимо, а иногда превышает их количество в ежегодно добываемых рудах. Это является еще и важным резервом для развития ресурсосбережения, охраны недр, рационального землепользования, экономической целесообразности и защиты окружающей среды.

Изучение вещественного состава хвостов обогащения железистых кварцитов проводилось на пробах, отобранных из хвостохранилищ действующих ГОКов КМА. Содержание кремнезема на Стойленском (СГОК) и Лебединском (ЛГОК) хвостохранилищах колеблется от 47,50% до 75,08%. Основная часть кремнезема связана с кварцем и лишь небольшое количество его входит в состав силикатов. Оксиды железа слагают рудные минералы - магнетит и гематит и в небольшом количестве содержатся в силикатах. Соотношение их в хвостах обогащения различно. По количеству Fe_2O_3 хвосты МГОКа (39,91 - 38,12%), где преобладает гематит, а по содержанию FeO высокие значения имеют хвосты ЛГОКа (6,26-10,71%), несколько меньше это содержание у хвостов СГОКа (5,04 - 7,03%). Глинозем Al_2O_3 , входящий в состав слюд, полевых шпатов, амфиболов в хвостах обогащения ЛГОКа и СГОКа, содержится примерно в одинаковых количествах (от 1,84% до 3,6%). Остальные компоненты – CaO , MgO преобладают в хвостах ЛГОКа (1,77-3,60%). Содержание Na_2O и K_2O на всех хвостохранилищах колеблется на одном уровне.

Таким образом, по химическому составу ХОЖК можно отнести к кварцсодержащим отходам с примесями оксидов железа, которые можно использовать для получения пигментов-наполнителей на кварцевой основе. Визуально, отходы обогащения представляют разнозернистый материал темно-серого цвета.

Размер зерен колеблется от 5 мм до - 0,05 мм. Состав хвостов обусловлен минеральным составом исходной руды, особенностями технологического процесса и характером дифференциаций материала в процессе заполнения хвостохранилища. Гранулометрический состав хвостов по створам приведен в табл.2. С удалением от места выпуска пульпы и с глубиной отбора наблюдается увеличение количества мелких фракций (0,1-0,045 мм).

Установлено, что в составе отходов в наибольшем количестве присутствуют фракции размером частиц 0,14-0,1мм.

В табл. 1 представлены результаты анализа хвостов СГОКа.

Таблица 1 – Минеральный состав ХОЖК

Fe общ, %	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P	CaO	MgO
10,24	3,39	6,4	71,27	1,83	0,146	0,15	3,07	3,11
MnO	TiO ₂	плотность хвостов в естественном состоянии, кг/м ³	в состоянии, кг/м ³	Высушенные: объемный вес скелета, кг/м ³	Влажность, %	Коэффициент фильтрации, м/сут		
0,091	0,101	2740		1600	9,5			1,1

Таблица 2 – Средние значения фракционного состава хвостов по поперечникам плотности распределения по мере удаления от зоны намыва

Метры	Гранулометрический состав по поперечникам в, масс. %							Средне взвеш., d, мм
	0,8	0,4	0,2	0,1	0,071	0,045	менее	
+20	4,6	27,4	35,2	8,93	12,2	2,1	9,57	0,334
+40	2,3	18,3	35,1	12,3	16,6	3,0	12,4	0,271
+60	3,4	15,5	31,3	13,4	19,4	4,4	12,6	0,256
+80	3,8	21,2	34,0	11,1	15,7	1,96	12,24	0,294
+100	2,4	8,6	28,2	18,2	23,8	3,53	15,27	0,208
+200	2,7	11,6	30,8	16,5	20,4	2,9	15,0	0,231

Физико-химические свойства хвостов представлены в табл. 3

Таблица 3 – Физико-химические свойства отходов ХОЖК

	S _{уд} , м ² /кг	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³
СГОК	301,3	1209	2740
ЛГОК	332,1	1260	2850

Для проведения разнообразных технологических процессов немаловажными являются сведения о размерах взаимодействующих частиц. Этот показатель особенно важен в производстве лакокрасочных материалов, так как качество краски, равномерность покрытия и гладкость поверхности во многом зависят от размера частиц пигмента-наполнителя. Результаты седиментационного анализа отходов ХОЖК

СГОК и ЛГОК (табл.4), показали, что размеры основной массы частиц находятся в интервале 20-60 мкм, что характеризует данный материал как имеющий высокую степень монодисперсности.

Согласно литературным источникам, диаметр частиц материала, используемого в качестве пигмента-наполнителя, должны находиться в пределах 0-70 мкм; таким образом, по этому показателю предлагаемый нами материал соответствует требованиям, предъявляемым к пигментам (табл.4). Содержание частиц более 70 мкм незначительное, поэтому для повышения дисперсности частиц отходов ХОЖК можно использоваться измельчение в мельницах мокрого помола в течение непродолжительного времени (5-10 мин).

Данные дисперсионного анализа показали, что отходы СГОКа содержат большее количество частиц диаметром до 10 мкм, поэтому в дальнейшей работе использовали отходы СГОКа, химический состав которых представлен в табл.1.

Таблица 4– Содержание частиц по фракциям в отходах ХОЖК, %

ХОЖК	Более 60 мкм	60-40 мкм	40-20 мкм	20-10 мкм	Менее 10 мкм
ЛГОК	20	35	36	15	5
СГОК	15	20	40	20	12

Технологический процесс исключает предварительное измельчение, повторную термообработку, проведение сложных технологических приемов и применение дорогих и дефицитных материалов. При этом не образуются вторичные отходы в виде сточных вод и отходящих газов. Полученные пигменты в зависимости от состава шихты и температуры обжига имеют различную цветовую гамму. Установлено, что температура обжига оказывает существенное влияние на цвет пигмента: при 900 °С он кирпично-оранжевый, а при 1000 °С окраска становится более интенсивной и приобретает красновато-коричневый цвет.

Анализируя химический состав и физико-химические свойства ХОЖК, а также литературные источники, нами выдвинута *научная концепция* о проведении термолиза данного отхода и получении на его основе железосодержащего пигмента-наполнителя в силикатные краски, ЛКМ и др.

Основной отличительной особенностью предлагаемой технологии утилизации является то, что процесс осуществляется по схеме: *термообработка-помол* с получением товарного продукта.

На рис.1 представлена теоретическая концепция по утилизации МСО - ХОЖК.

Комплексное использование отходов горнодобывающей, металлургической, химической, энергетической и других отраслей промышленности в широких масштабах, а также ликвидация отвалов промышленных отходов обеспечит большой экономический эффект, уменьшит использование природных ресурсов, освободит занятые под полигоны и хранилища земли и значительно улучшит экологическую ситуацию в регионе.



Рисунок 1 – Схема утилизации металлсодержащих отходов КМА.

Основным процессом при формировании качественных пигментов-наполнителей с заданными цветовыми и физико-химическими свойствами является стадия обжига. Наиболее распространенные обжиговые аппараты непрерывного действия (вращающиеся и шахтные печи) рассчитаны на термообработку значительных масс кускового материала.

На рис. 2 представлена технологическая схема получения пигментов-наполнителей прокаливанием ХОЖК.

Важнейшими характеристиками пигментов являются: цвет, его насыщенность и яркость, светостойкость. Эти параметры определяли на компараторе ФКЦШ-М. Масляные краски на основе ХОЖК обладают универсальной адгезией к бетону, кирпичу, натуральному камню, асбестоцементу, древесине (1 балл); имеют высокое сродство к перечисленным материалам.

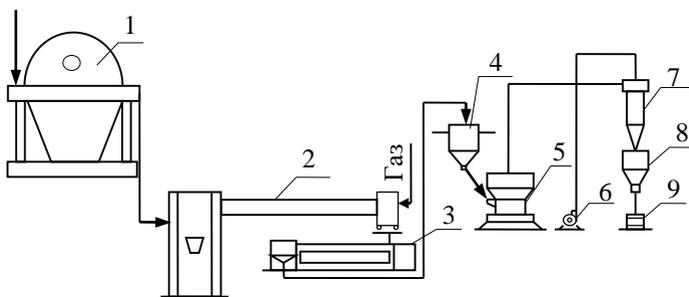


Рисунок 2 – Технологическая схема получения пигментов- наполнителей прокаливанием ХОЖК: 1 - барабанный вакуум-фильтр; 2 - вращающаяся печь; 3 - холодильный барабан; 4 - бункер-хранилище; 5 - роliko-кольцевая мельница; 6 - вентилятор; 7 - сепаратор; 8 - бункер; 9 - упаковочная машина

Нами предложены технологические рекомендации по приготовлению краски с использованием пигмента на основе ХОЖК. В смесителе смешивают в течение 30-35 минут пигмент с цинковыми белилами, затем добавляют сиккатив 64П, приливают олифу «Оксоль», все тщательно перемешивают в течение 3-4 минут. Полученную краску можно наносить с помощью кисти, валика или краскораспылителя.

По технологии завода АО «Краски Квил» были разработаны составы масляных красок для крыш с антикоррозионными свойствами на основе полученного пигмента-наполнителя.

Составы красок под условными названиями МА-1, МА-2, МА-3 и МА-4 представлены в табл.5.

Таблица 5 – Составы приготовленных красок

Наименование компонентов масляной краски	Номера составов и содержание компонентов по составам, масс.%			
	МА-1	МА-2	МА-3	МА-4
ХОЖК	30	35	40	53,5
Белила цинковые	3	3	3	3
Сиккатив 64П	3,5	3,5	3,5	3,5
Олифа «Оксоль»	40	40	40	40

Исследования свойств пигментов-наполнителей, проведенные в лаборатории завода по изготовлению красок АО «Краски КВИЛ» показали, что качество краски, полученной на основе пигмента – наполнителя из отходов ХОЖК по предлагаемой технологии, не

уступает масляным краскам, изготавливаемым по традиционной технологии.

Технологии получения неорганических железоксидных пигментов на кварцевой основе при переработке твердых отходов горно-обогатительных предприятий металлургического комплекса могут быть использованы в строительной, лакокрасочной промышленности и в производстве пигментов-наполнителей для полимерных материалов (пластмасс, резин, эмалей, красок, клеев и др.), а также упростить технологию их получения. Кроме того, позволят улучшить свойства ЛКМ, полимерных композиций и др.

Разработанная технология позволяет снизить энергозатраты, удешевить и упростить технологию получения пигмента-наполнителя с улучшенными малярно-техническими показателями: укрывистостью и маслостойкостью, который можно использовать в различных отраслях промышленности и строительстве. Полученный продукт является дешевым, отечественным и применение его может решить экологическую проблему регионов по утилизации крупнотоннажных техногенных кремнеземистых отходов горно-обогатительных предприятий металлургического комплекса, расширяя их рынок сбыта.

Кроме того, предложенный способ обеспечивает полную утилизацию отходов горно-обогатительных предприятий металлургического комплекса, способствует ликвидации хвостохранилищ и возврату отчужденных земель в народное пользование.

При строительстве коттеджей применяются цветные кладочные растворы, наличие красящего пигмента в котором никак не влияет на характеристики раствора. Разница в кладочных растворах в составе, кроме разного соотношения составляющих, зависит от наличия различных модификаторов, пластификаторов и загустителей в смеси.

Цветные кладочные растворы сегодня широко применяют для кладки внутренних и наружных конструкций. Так, например, ими часто отделывают фасады домов и перегородки. При этом данные виды строительных растворов активно используют как для строительства, так для ремонта и выполнения отделочных работ. Важно и то, что цветные кладочные растворы применяют для кладки кирпичных и каменных стен. Также их используют на стыках плитки при фасадных и внутренних работах. Кроме того, цветные кладочные растворы в последнее время применяют для мощения дорожек брусчаткой и тротуарной плиткой, при оформлении каменных и печных труб, каминов, и, вообще, для оштукатуривания любых строительных поверхностей. Любые цветные кладочные растворы представляют собой

строительные растворы. А, в свою очередь, все виды строительных растворов состоят из тщательно продозированной, мелкозернистой смеси из неорганического вещества, мелкого заполнителя и небольшого количества воды. В состав цветных кладочных растворов входит цемент, известь или цемент и известь. Как правило, это белый цемент, в который, в зависимости от нужного цвета и его насыщенности, в строгой пропорции добавляют минеральные красители, созданные на основе оксидов железа. Согласно принятым европейским нормам, содержание красителей в растворах должно не превышать 8%: большое количество краски снижает технические характеристики состава.

Цветные кладочные растворы имеют по сравнению с обычным бетоном ряд преимуществ: 1) высыхают в течение нескольких часов; 2) по своему усмотрению можно выбрать цвет и насыщенность раствора; 3) на поверхности кладочного раствора не образуются «высолы»; 4) достаточно невысокая стоимость. Кроме того, цветные кладочные растворы обладают следующими свойствами: 1) после высыхания обладают особой прочностью и защищают облицовку от повреждений; 2) обработанные швы смотрятся очень аккуратно, нивелируются небольшие дефекты укладки и придается поверхности законченный вид; 3) такая кладка долговечна, так как цветные кладочные растворы обладают высокой прочностью сцепления с кирпичом; 4) кладочные растворы водо- и морозостойки; 5) отличаются экологической безопасностью; 6) имеют высокую стойкость к выцветанию. Таким образом, такие свойства позволили цветным кладочным растворам прочно занять свою нишу в строительной индустрии. Подбирая цвет шва, его можно выделить с максимальным контрастом, силой или, наоборот, слить в один колер с кирпичом.

Использование современных цветных кладочных растворов придаст дому определенную уникальность и шарм и увеличит его долговечность (рис.3).

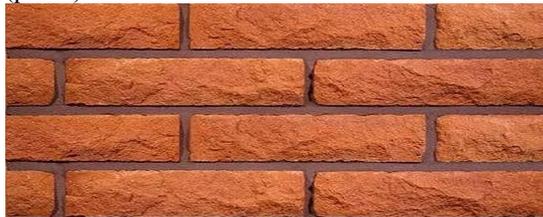


Рисунок 3 – Кладочный раствор с пигментом термолитным ХОЖК

Кроме контрастного подчеркивания линии кладки кирпичей, цветное связующее может использоваться для полного сокрытия структуры стены. При этом сам растворный шов имеет абсолютное совпадение по цвету с окраской облицовочного кирпича.

Кладочные растворы в поставляемом виде экологически безопасны, обладают высокой химической стойкостью и стабильными физико-механическими показателями в течение всего периода эксплуатации

Рассматривалась возможность использования ХОЖК в качестве компонента для получения сухих строительных смесей (ССС), используемых для отделки фасадов. Известно, что кварцевый песок широко используется для приготовления ССС (рис.4).



Рисунок 4 – Использование кварцевого песка в составах различных сухих строительных смесей

Поскольку основным минералом ХОЖК является кварц (SiO_2), то возможно использование этих отходов в составах ССС для штукатурных работ с полной или частичной заменой кварцевого песка.

В работе для приготовления ССС применяли следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ЗАО «Белгородский цемент»; кварцевый песок Нижнеольшанского месторождения, г. Белгород; хвосты обогащения железистых кварцитов ЛГОКа, Белгородская область.

Для определения влияния отхода ХОЖК на активность цементного вяжущего было исследовано изменение предела прочности при сжатии цементного камня с различным содержанием отхода - при замене кварцевого песка на ХОЖК в количестве от 25 до 75%. Активность цементного камня оценивали на образцах размером $20 \times 20 \times 20$ мм,

которые готовили из теста нормальной густоты, испытывали в возрасте 3, 7 и 28 суток хранения в нормальных условиях согласно ГОСТ 310.4-81(рис.5).

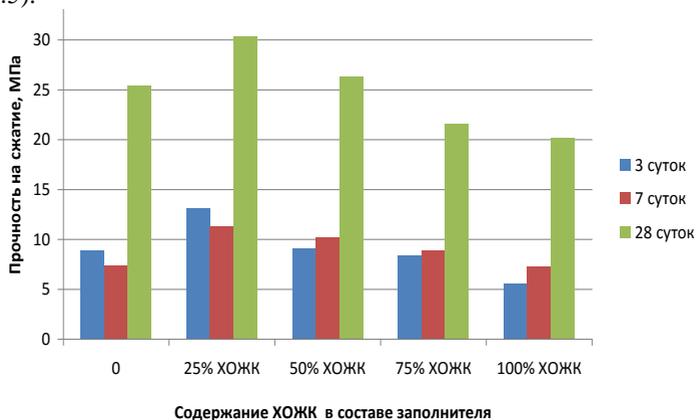


Рисунок 5 – Кинетика изменения предела прочности на сжатие цементного раствора с учетом замены кварцевого компонента на ХОЖК

Установлено, что введение до 50% ХОЖК в состав композиционного вяжущего способствует повышению его прочности на сжатие на всех этапах твердения (рис.5). Максимальный прирост прочности составил 17% в случае замены 25% кварцевого песка на ХОЖК в возрасте образцов 28 суток. Дальнейшее увеличение содержания отхода в системе приводит к снижению прочности, что вероятно обусловлено увеличением водопотребности смеси. Исходя из результатов микроскопических исследований, а также ранее полученных данных, высокая водопотребность ХОЖК обусловлена спецификой морфологии зерен, высокоразвитая поверхность которых, отличается шероховатостью с множеством остроугольных обломков, что в комплексе способствует гигроскопичности отхода.

Введение ХОЖК в количестве 25% взамен кварцевого песка, приводит к формированию хорошо закристаллизованных крупных игольчатых кристаллов новообразований – гидросиликатов кальция, с повышенной площадью контактных зон, что обеспечивает увеличение прочности на сжатие готовых композиционных материалов.

На сухие строительные смеси для устройства полов с использованием ХОЖК и пигментов-наполнителей на основе ХОЖК разработаны Технические условия.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08054 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Уральский В.И., Севостьянов В.С., Сеница Е.В., Уральский А.В. Исследование траектории движения мелющих тел в помольных камерах вибрационно-центробежного // Вестник БГТУ, 2016. № 3. С.129-135.
2. Евтушенко Е.И. Активационные процессы в технологии строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2003. - 209 с
3. Свергузова С.В., Старостина И.В., Тарасова Г.И., Фомина Е.В. Использование хвостов обогащения железистых кварцитов в сухих строительных смесях / International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2015. Т. 10, № 24. С. 45082-45090.

О РАЗРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА И ОПОВЕЩЕНИЯ О ЗАГРЯЗНЕННОСТИ МАЛЫХ РЕК БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

chernomorets@bsu.edu.ru

Черноморец А.А., канд. техн. наук, доц.,
Петина М.А., канд. геогр. наук, доц.,
Лебедева М.Г., канд. геогр. наук, доц.,
Болгова Е.В.,
Зайцева Н.О.,
Коваленко А.Н.,
Черноморец Д.А.

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

Аннотация. В статье рассмотрены основные принципы построения информационной технологии мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек региона с использованием интеллектуальной системы управления, а также приведены результаты разработки ее отдельных ее блоков, включая разработку функциональных диаграмм ее работы с применением Интернет-технологий.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, экспертное оценивание, прогнозирование, искусственная нейронная сеть, базы данных, базы знаний, Интернет-портал

Белгородская область обладает значительным объемом водных ресурсов. Реки Белгородской области используются преимущественно для водоснабжения населения, сельскохозяйственного водоснабжения, в рекреационных целях, а также как приемники промышленных и коммунальных стоков. Практически все водотоки Белгородской области могут быть отнесены к малым рекам, например, Ворсклица, Разуменка, Корень, Айдар, Черная Калитва, Потудань и др. Современная водохозяйственная ситуация в регионе определяется как природно-климатическими факторами, так и факторами, связанными с производственно-хозяйственной деятельностью [1]. Первая группа факторов связана с естественными процессами формирования речного стока и подземных вод, вторая группа факторов отражает многообразие антропогенных факторов в пределах речных бассейнов, влияющих на величину, изменчивость составляющих речного стока, гидрологические

процессы, динамику подземных вод и их качественное состояние. Часто указанные группы факторов взаимосвязаны. При данных обстоятельствах актуальным является мониторинг водных ресурсов.

В настоящее время неравномерное распределение водных ресурсов во времени и пространстве при одновременном увеличении их потребления, а также возрастающее антропогенное воздействие на естественный водный режим привело к загрязнению и истощению водных ресурсов, что требует разработки и составления схем рационального использования и охраны водных ресурсов на региональном уровне, создания постоянно действующей системы контроля загрязненности, учета и расходования водных ресурсов с целью оперативного управления водным хозяйством.

Анализ работ ученых по проблеме мониторинга и контроля загрязненности водных ресурсов показал наличие существенного количества показателей загрязненности рек.

Очевидно, учитывая значительное разнообразие факторов воздействия на гидрологическую среду, для обеспечения информационной поддержки оперативного принятия решений с целью снижения уровня экологических угроз, в частности контроля и борьбы с загрязненностью рек Белгородской области, актуальным является развитие средств анализа их состояния и предоставления адекватных сведений. В работе указанную проблему предложено решать с помощью разработки соответствующей интеллектуальной информационной технологии [2] оценки состояния малых рек, прогнозирования их загрязненности, мониторинга и оповещения о соответствующих экологических угрозах в Белгородской области, включая:

- экспертное оценивание уровней загрязненности рек,
- прогнозирование состояния водных объектов,
- разработку структуры интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек,
- разработку принципов работы интеллектуальной системы мониторинга и оповещения об экологических угрозах с применением Интернет-технологий.

Разработка экспертного метода оценивания загрязненности рек

С целью принятия решений об уровне загрязненности малых рек в рамках разрабатываемой интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек разработан экспертный метод, в основе которого лежит метод анализа иерархий, что обеспечивает адекватность разработанного метода

поставленной задаче.

Экспертный метод выявления водных объектов с высоким уровнем загрязненности заключается в последовательном выполнении следующих шагов:

- применение метода анализа иерархий (МАИ) для определения уровня влияния (важности) отдельного фактора загрязнения в конкретной экологической ситуации,

- на основе экспертной оценки рассчитываются весовые коэффициенты K_1, K_2, \dots, K_n (выполняется нормирование экспертных оценок) для каждого фактора загрязнения, n – количество фактора загрязнения,

- вычисляются индексы $I_{11}, \dots, I_{ij}, \dots, I_{nm}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$ загрязненности водного объекта по каждому фактору загрязнения, m – количество водных объектов, например, при условии, что i -тый фактор загрязнения, характеризующийся значением предельно допустимой концентрации (ПДК) p_i , имеет значение f_i , то индекс загрязненности I_{ij} для j -го водного объекта определяется на основании выражения,

$$I_{ij} = \begin{cases} \frac{f_i - p_i}{p_i}, \text{ если } f_i > p_i & i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

- вычисляется уровень Y_j , $j = 1, 2, \dots, m$, загрязненности конкретного водного объекта, $Y_j = \sum_{i=1}^m K_i I_{ij} / m$, $j = 1, 2, \dots, m$.

- на основании значений уровня Y_j , $j = 1, 2, \dots, n$, загрязненности отдельного водного объекта формируются сведения о качестве воды (выполняется группировка по децилям) (таблица 1).

Таблица 1 – Значения уровней загрязненности и качество воды

Очень чистая	Чистая	Умеренно чистая	Загрязненная	Грязная
0-0,20	0,21-0,40	0,41-0,60	0,61-0,80	0,81-1

Для принятия решения о пригодности загрязненного водного объекта для конкретного водопользования на рисунке 1 представлена иерархия, где в качестве альтернатив выступают виды водопользования.

Экспертный метод принятия решений о пригодности водного объекта для конкретного водопользования на основе метода анализа иерархий состоит в следующем [3].

1. Определение цели. Целью является оценка пригодности водного объекта для конкретного вида водопользования.

2. Определение критериев. В качестве критериев используются физические, химические и гидробиологические показатели.

3. Определение альтернатив. В качестве альтернатив выступают виды водопользования. Различают пять видов водопользования: хозяйственно-питьевое, промышленность, рыбное хозяйство, купание, спорт, транспорт.



Рисунок 1 – МАИ: Оценка качества речной воды

Для критериев строятся матрицы парных сравнений. Далее устанавливаются приоритеты альтернатив по каждому критерию на основании расчета вектора глобальных приоритетов, то есть определяется пригодность водного объекта для конкретного вида водопользования.

Новизна разработанного экспертного метода принятия решений об уровне загрязненности малых рек определяется применением метода анализа иерархий для оценки качества речной воды (при этом рекомендуется использовать метод анализа иерархий сезонно или при резком изменении условий окружающей среды, таких как наводнения, засуха, техногенные аварии и т.д.), а также тем, что он позволяет для отдельного водного объекта получить характеристику его пригодности для каждого вида водопользования с позиций оценки уровня загрязненности воды.

Разработка методов прогнозирования загрязненности водных объектов

Одним из структурных элементов разрабатываемой интеллектуальной системы управления является блок прогнозирования на основе использования частотных представлений и нейронных сетей.

Математическая модель и метод прогнозирования на основе частотных представлений

В проекте предлагается применять новый эффективный инструмент прогнозирования изменений показателей загрязненности малых рек региона на основе частотного анализа (косинусное преобразование), используемого для выявления устойчивых значимых периодических закономерностей в изменении геоэкологического состояния малых рек.

Метод прогнозирования был разработан на основании свойства реальных процессов – значимые периодические закономерности (энергетические характеристики) в последовательных отрезках зарегистрированных данных сохраняются в течение определенного периода времени [4].

Математическая модель, на основании которой вычисляется прогнозируемое значение, формулируется следующим образом: при условии совпадения долей P_V энергии в частотной подобласти V , исходного вектора $(x_1, x_2, \dots, x_{N-1}, x_N)^T$ и вектора $(x_1, x_2, \dots, x_N, x_{N+1})^T$, содержащего прогнозируемое значение x_{N+1} , имеем:

$$x_{N+1} = \frac{-\vec{g}_N^T \vec{x} \pm \sqrt{(\vec{g}_N^T \vec{x})^2 - (g_{N+1,N+1} - P_V)(\vec{x}^T B_V^{N+1} \vec{x} - P_V \sum_{i=1}^N x_i^2)}}{g_{N+1,N+1} - P_V}, \quad (2)$$

где \vec{g}_N – вектор-столбец, элементы которого совпадают с элементами $\{g_{N+1,1}, g_{N+1,2}, \dots, g_{N+1,N}\}$ субинтервальной матрицы G_V^{N+1} косинусного преобразования [5]; $B_V^N = (g_{i_1 i_2}^{N+1})$, $i_1, i_2 = 1, 2, \dots, N$, – матрица размерности $N \times N$, являющаяся угловой подматрицей матрицы G_V^{N+1} .

Проведенные вычислительные эксперименты [6] по оцениванию эффективности метода прогнозирования состояния загрязненности малых рек на основе частотных представлений в сравнении с результатами использования известных методов прогнозирования показали его высокую работоспособность.

Так, на рисунке 2 приведены результаты вычислительных

экспериментов по сравнению результатов прогнозирования на основе разработанного метода, метода линейного предсказания и прогнозирования на основе сплайнов – исходными данными являются значения, полученные на Старогородском водозаборе №4, скважина №25, в период с 15.01.2007 по 30.07.2013 для фактора загрязнения сульфаты.

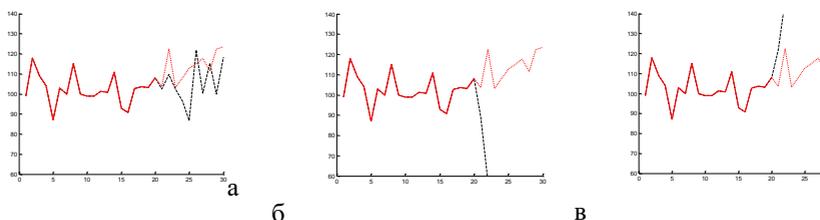


Рисунок 2 – Результаты прогнозирования:

а) разработанный метод, б) метод линейного предсказания, в) сплайн
 (..... – реальные значения, — — — — исходные, — — — — прогнозируемые)

Средняя погрешность прогнозирования δ_{cp} для данного вычислительного эксперимента: метод линейного предсказания – 0.8002, прогнозирование на основе сплайнов – 3.2962, разработанный метод – 0.0929.

Вычислительные эксперименты показали, что применение разработанного метода прогнозирования состояния загрязненности малых рек на основе частотных представлений в большинстве случаев позволяет получить более точные прогнозные значения на длительном промежутке времени.

Прогнозирование значений показателей загрязненности рек на основе искусственных многослойных нейронных моделей

Для прогнозирования сложного, многофакторного характера изменений гидрохимического состояния малых рек в проекте разработан метод прогнозирования уровней загрязненности малых рек с использованием современных искусственных интеллектуальных систем, основанных на нейросетевых технологиях.

Анализ известных нейросетевых моделей и архитектуры нейросетей, применяемых для решения подобных задач, показал, что наиболее подходящим для прогнозирования является четырехслойный перцептрон: входной слой, имеющий четыре нейрона, выходной – один нейрон и два скрытых слоя по 10 и 4 нейрона в

каждом соответственно (рисунок 3).

Анализ алгоритмов обучения показал, что наиболее целесообразным для четырехслойного персептрона является алгоритм обратного распространения ошибки и сопряженных градиентов. Для обучения использовано сто итераций обратного распространения ошибки, а также двадцать пять итераций – сопряженными градиентами. Обучающие и тестовые выборки определены на основании данных, полученных на Старогородском водозаборе №4, скважина №25.

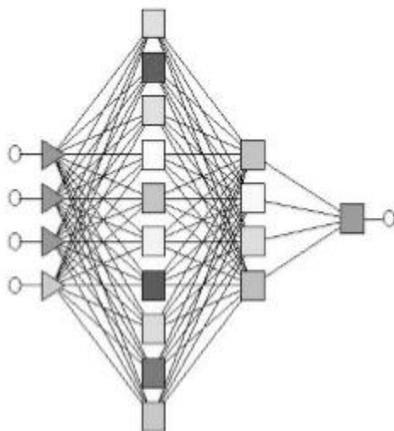


Рисунок 3 – Архитектура четырехслойного персептрона, используемого при прогнозировании

Для активации нейронов многослойного персептрона была использована гиперболическая функция, представляющая собой функцию гиперболического тангенса:

$$y = (e^{as} - e^{-as}) / (e^{as} + e^{-as}), \quad (3)$$

где a – коэффициент, характеризующий крутизну функции.

Многослойный персептрон (MLP) был реализован в пакете MATLAB. Были проведены сравнительные вычислительные эксперименты по оцениванию результатов применения разрабатываемого метода прогнозирования с известными методами, а также с разработанным ранее в проекте методом прогнозирования на основе частотных представлений.

Средняя погрешность прогнозирования δ_{cp} для данного вычислительного эксперимента имеет следующие значения: метод линейного предсказания – 0.6750, прогнозирование на основе

сплайнов – 18.5425, метод на основе частотных представлений – 0.1588, разрабатываемый метод – 0.147, что демонстрирует эффективность разработанного метода по сравнению с другими методами.

Использование разработанных методов прогнозирования имеет существенное значение при подготовке сведений в системах поддержки принятия решений об экологических угрозах.

Разработка интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

В работе, учитывая сложный характер зависимостей характеристик водных ресурсов, предположено при проектировании системы мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек использовать интеллектуальную систему управления на основе применения интеллектуальных информационных технологий.

В разработанной структуре интеллектуальной системы управления (ИСУ) процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек присутствуют как традиционные элементы системы управления (СУ), так и элементы модели обработки знаний, которые связаны с реализацией искусственного интеллекта, то есть с использованием технологий экспертных систем, базы знаний, нейронных сетей, принятия решений и т.п. [7].

Структура разрабатываемой ИСУ процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек [8] (рисунок 4) связана с построением модели системы [9].

Математическая модель интеллектуальной системы управления основана на взаимосвязи трех компонент:

$$Y = F(IP, UU, OU), \quad (4)$$

где Y – состояние объекта управления, описывается текущим состоянием работ по мониторингу состояния водных объектов и рассылке сигналов оповещения, а также текущими знаниями о факторах загрязнения, F – оператор, который реализуется на основе применения инструкций, рекомендаций и правил по сбору, передаче, хранению данных о состоянии водных объектов и по оповещению, IP – интеллектуальный преобразователь, UU – управляющее устройство системы, OU – объект управления.

В качестве интеллектуального преобразователя в системе управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек используется динамическая экспертная система (ЭС). Математическая модель интеллектуального преобразователя в задаче мониторинга и оповещения основана на применении экспертного

оценивания на основе метода анализа иерархий.

Управляющее устройство системы UU формирует управляющие воздействия на объект управления OU для координирования действий по мониторингу и оповещению путем формирования рекомендаций, указаний и инструкции по порядку, частоте и видам проведения работ по мониторингу различных показателей загрязненности рек в текущий момент времени, также формирует различные сигналы оповещения.

Объект управления OU представляет собой процесс мониторинга и оповещения, в результате функционирования которого определяются значения факторов загрязнения, и осуществляется рассылка сигналов оповещения.

Разработка структуры базы данных интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

Одним из элементов интеллектуальной системы управления является база данных.

В работе была спроектирована структура базы данных и построена ее логическая модель. Основные элементы разработанной структуры базы данных в ИСУ мониторинга состояния малых рек представлены на рисунке 5.

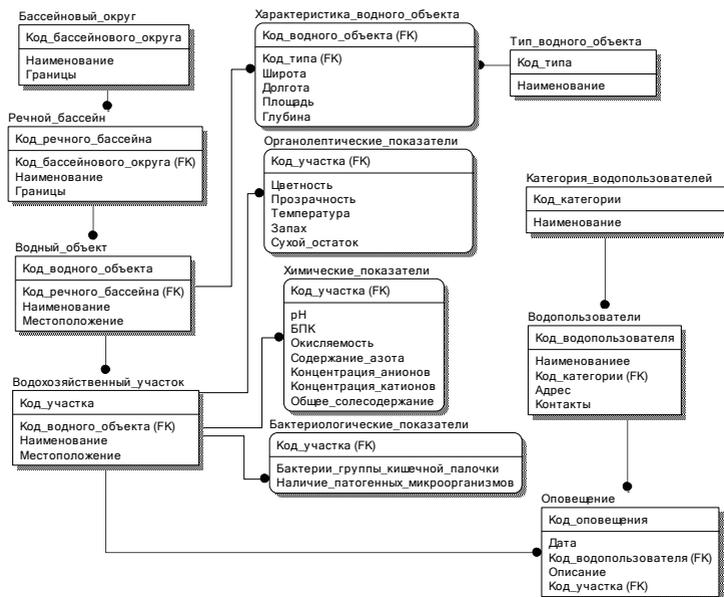


Рисунок 5 – Фрагмент структуры базы данных в ИСУ мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

Данная структура может быть расширена необходимыми дополнительными параметрами, которые влияют на качество вод малых рек, а также на процесс мониторинга и оповещения.

Разработка многоуровневой модели представления знаний

В соответствии с разработанной структурой интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек в рамках динамической экспертной системы предусмотрено наличие базы знаний.

Проанализировав достоинства и недостатки существующих моделей представления знаний, для реализации базы знаний для разрабатываемой ИСУ была выбрана фреймовая модель, так как модели, основанные на фреймах, объединяют основные достоинства моделей представления знаний известных типов.

В соответствии с сущностями разрабатываемой базы данных были выделены соответствующие фреймы, которые будут хранить в себе знания, необходимые для анализа состояния малых рек. Также выделены соответствующие фреймы для формирования сигналов оповещения о загрязненности малых рек и соответствующие слоты.

На основе указанных фреймов и слотов была спроектирована фреймовая модель представления знаний. Фрагмент разрабатываемой модели представления знаний представлен на рисунке 6.

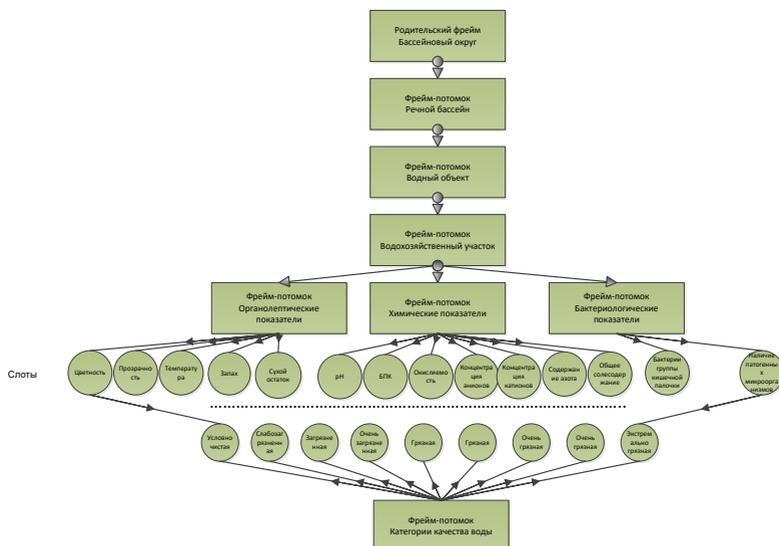


Рисунок 6 – Фрагмент фреймовой модели представления знаний в ИСУ мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

Данная модель может быть расширена необходимыми дополнительными фреймами, описывающими новые появляющиеся антропогенные факторы, влияющие на качество водных объектов, которые будут способствовать проведению мониторинга качества вод малых рек, а также повышению эффективности процесса оповещения об их состоянии.

Разработка принципов работы интеллектуальной системы мониторинга и оповещения об экологических угрозах с применением Интернет-технологий

В процессе выполнения проекта разработаны функциональные диаграммы работы интеллектуальной системы мониторинга и оповещения об экологических угрозах [10].

На рисунке 8 представлена диаграмма, на которой выделены основные потребители результирующей информации (внешние сущности) в разрезе их взаимодействия с интеллектуальной системой управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах.

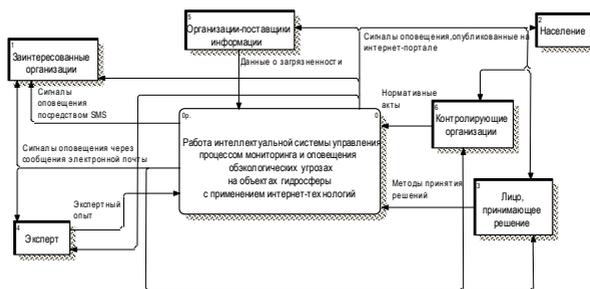


Рисунок 8 – Диаграмма «Работа интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на объектах гидросферы с применением Интернет-технологий»

На рисунке 9 представлена диаграмма, показывающая прохождение потоков информации между основными структурными элементами интеллектуальной системы управления: базой данных и базой знаний, а также между основными функциональными блоками, описывающими внутреннюю работу Интернет-портала.

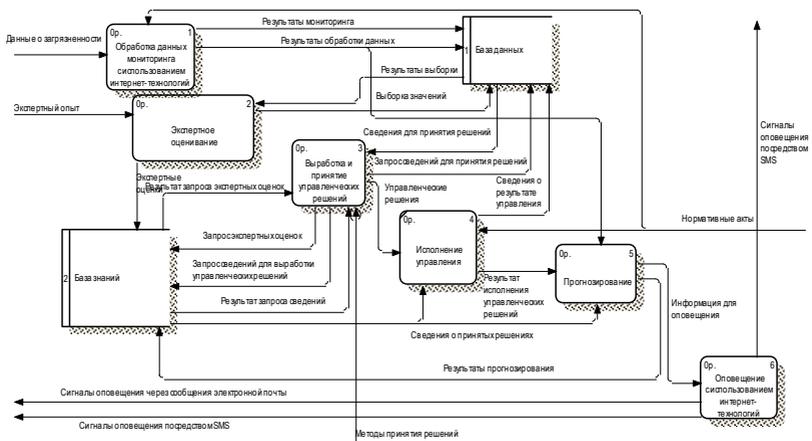


Рисунок 9 – Диаграмма декомпозиции «Работа интеллектуальной системы управления»

Разработанные функциональные диаграммы работы интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах определяют принципы работы данной системы и обеспечивают эффективную организацию выполнения возложенных на нее функций получения оценок геоэкологического состояния малых рек региона, предоставления сведений об их состоянии, прогнозирования их загрязненности и своевременного оповещения заинтересованных организаций и населения об экологических угрозах на водных объектах на основе использования элементов управления знаниями, технологий экспертных оценок, принятия решений и прогнозирования в сочетании с применением Интернет-технологий.

Разработка теоретических основ построения структуры информационного портала, обеспечивающего обработку знаний об экологических угрозах на объектах гидросферы

В работе была поставлена цель создания интеллектуальной системы мониторинга и оповещения об экологических угрозах на водных объектах региона. Для оповещения населения используются различные средства, к которым относятся средства массовой информации такие как радио, телевидение, Интернет-источники, сообщения электронной почты, SMS-рассылка и др.. Для достижения цели с точки зрения реализации доступа был выбран наиболее

доступный для большинства потенциальных пользователей способ – Интернет-портал, так как на своих страницах он сможет содержать актуальную информацию о загрязненности малых рек в режиме реального времени, а также предоставит возможность сообщать об обнаруженной проблеме.

Разрабатываемая структура Интернет-портала отвечает требованиям безопасности и надежности, которые достигаются за счет заранее продуманных и разработанных прав доступа (ролей) к информации.

На рисунке 10 представлена функциональная диаграмма декомпозиции контекстной диаграммы работы Интернет-портала интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на объектах гидросферы, которая показывает взаимодействие структурных элементов Интернет-портала в терминах стандарта IDEF0.

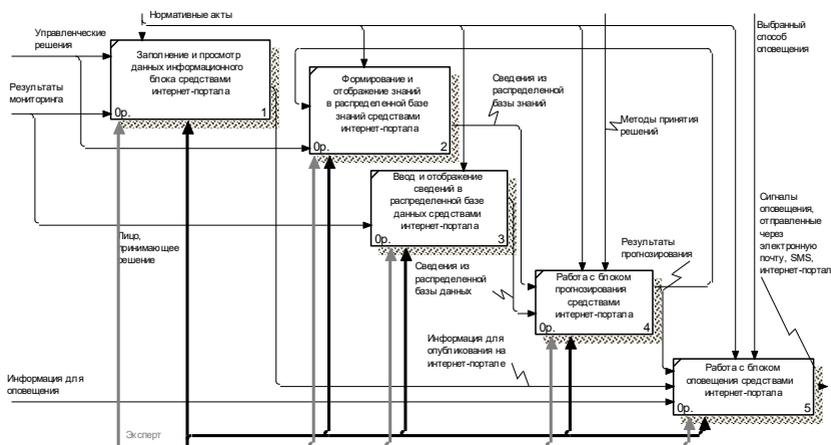


Рисунок 10 – Функциональная диаграмма декомпозиции работы Интернет-портала интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на объектах гидросферы

В работе сформулированы принципы и разработаны схемы и диаграммы работы Интернет-портала интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на объектах гидросферы, которые определяют основы построения структуры информационного портала, обеспечивающего обработку знаний об экологических угрозах на объектах гидросферы.

Таким образом, полученные в ходе выполнения проекта результаты

могут служить основой для разработки интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на малых реках региона, а также Интернет-портала, обеспечивающего ее функционирование.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта № 14-47-08052 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Крымская О.В., Лебедева М.Г. Качество вод в реках Центрально-Черноземного региона: учебное пособие. Белгород: Изд-во «Политерра», 2004.
2. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
3. Черноморец А.А., Петина М.А., Путивцева Н.П., Коваленко А.Н. Оперативное принятие управленческих решений в сфере водопользования на загрязненных водных объектах // Успехи современного естествознания. 2016. № 11 (часть 2). С. 427-432.
4. Черноморец А.А., Болгова Е.В., Черноморец Д.А., Коваленко А.Н. Метод прогнозирования на основе частотных представлений // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 2015. № 13 (210). Вып. 35/1. С. 164-169.
5. Черноморец А.А., Петина М.А., Лебедева М.Г., Болгова Е.В., Зайцева Н.О., Коваленко А.Н. О методе выделения оптимальных частотных компонент наборов данных на основе косинус-частотных представлений. Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова. 2015. С. 446-453.
6. Черноморец А.А., Болгова Е.В., Черноморец Д.А., Болгова А.В. Об оценке эффективности метода прогнозирования на основе косинусного преобразования // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 2016. № 2 (223). Вып. 37. С. 114-118.
7. Черноморец А.А., Петина М.А., Коваленко А.Н., Черноморец Д.А. Особенности построения интеллектуальных систем мониторинга. Академическая наука - проблемы и достижения. Материалы VII международной научно-практической конференции. North Charleston, SC, USA, 2015. С. 189-191.
8. Черноморец А.А., Петина М.А., Лебедева М.Г., Болгова Е.В., Зайцева Н.О., Коваленко А.Н., Черноморец Д.А. О разработке структурной схемы интеллектуальной системы управления процессом мониторинга

- и оповещения о загрязненности малых рек [Электронный ресурс] Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. 25-26 февраля 2016, Белгород. Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова. 2016. С. 1-10.
9. Степанов М.Ф. Принципы построения и архитектура интеллектуальных систем управления. XII Всероссийское совещание по проблемам управления вспу-2014 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 592-601.
 10. Черноморец А.А., Зайцева Н.О., Болгова Е.В. О теоретических основах работы информационного портала, обеспечивающего обработку знаний об экологических угрозах на объектах гидросферы // Фундаментальные исследования. 2016. № 12 (часть 2). С. 344-348.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОБАВОК ДАД -ТА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА

vyya@intbel.ru

**Ядыкина В.В., д-р техн. наук, проф.,
Траутвайн А.И., канд. техн. наук, доц.,
Холопов В.С., аспирант**

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

Аннотация. Показана возможность снижения температуры, при которой происходит приготовление и укладка асфальтобетонной смеси за счет введения в битум специально разработанной добавки, что приводит к снижению расхода топлива в процессе производства, значительно уменьшает количество выбросов вредных веществ в атмосферу, увеличивает период, в течение которого смесь пригодна к укладке, и расстояние ее транспортирования к месту работ, а физико-механические характеристики асфальтобетона не ухудшаются. В результате снижения температуры укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси может быть продлен сезон строительства автомобильных дорог и значительно уменьшен прессинг на окружающую среду.

Ключевые слова: теплый асфальтобетон, температура приготовления и уплотнения смеси, температуропонижающие добавки.

Производство горячих асфальтобетонных смесей, которые широко применяются для строительства дорожных покрытий, связано с высокими энергозатратами, выбросами в атмосферу большого количества загрязняющих веществ, ограничением времени транспортировки и продолжительности строительного сезона.

За последние 15-20 лет в Европе, а затем в США, были разработаны новые технологии, позволяющие понизить на 20-40 °С температуру перемешивания асфальтобетонной смеси, приготовленной на вязком битуме, без ухудшения характеристик покрытия по сравнению с традиционным асфальтобетоном [1-2].

Это достигается за счет физико-химических эффектов, приводящих к снижению сопротивления смеси сдвигу во время ее приготовления и укладки. За такими смесями закрепилась аббревиатура WAM (Warm

Fsphalt Mixture), т.е. теплые асфальтобетонные смеси. Они обладают рядом преимуществ [3].

Исследования в области получения качественных дорожных покрытий на основе теплых асфальтобетонных смесей в настоящее время активно ведутся учеными разных стран [4-11].

В России проблеме изучения теплого асфальтобетона также уделяется достаточно большое внимание.

Авторами данной работы в течение последних лет проводилась разработка и исследование новых добавок (серии ДАД-ТА) для производства теплых асфальтобетонных смесей [12-13].

Результаты исследований по влиянию разработанных добавок на характеристики битума свидетельствуют о том, что добавки при их введении и повышении концентрации в вяжущем несколько снижают вязкость битума, повышают растяжимость при температуре 25 °С, практически не влияют на температуру размягчения, повышают сцепление вяжущего с каменными материалами [12]. Влияние импортной добавки Evotherm J1 аналогично.

Указанные изменения свойства битума в результате использования добавки по традиционной технологии (без снижения температуры приготовления и уплотнения) позитивно отразились на физико-механических характеристиках асфальтобетона.

Результаты свидетельствуют о том, что введение добавки несколько повышает прочность при 20 и 50 °С и снижает этот показатель при 0 °С, причем при увеличении концентрации исследуемой добавки эффект ее положительного влияния повышается.

Наибольший эффект от действия добавки проявляется на показателях водонасыщения и водостойкости асфальтобетона, что очевидно связано с улучшением обволакивания минеральных материалов битумом за счет снижения его вязкости и повышения адгезионных свойств, обусловленных составом добавки.

Так, водостойкость асфальтобетона без использования добавки составляет 0,86, при концентрации добавки 0,6 % от массы битума этот показатель повышается до 0,91, а при введении 1% - до 0,96.

Основным назначением добавок для производства теплого асфальтобетона является снижение температуры приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей без ухудшения качества дорожного покрытия. В связи с этим изучено изменение физико-механических характеристик асфальтобетона, полученного из смесей, приготовленных при различных температурах (от 155 до 130 °С) и

уплотненных при температурах от 150 до 100 °С. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Для исследований использовалась асфальтобетонная смесь типа Б II марки следующего состава: гранитный щебень фракции 10-20 мм – 41 %, песок из отсева дробления гранита фракции 0-5 мм - 14 %, минеральный порошок - 9 %, битум БНД 60/90 - 5,6 % (сверх 100% минеральной части).

Таблица 1 – Влияние добавки ДАД-ТА на физико-механические характеристики асфальтобетона в зависимости от температуры приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси

Температура приготовления смеси, °С	Температура уплотнения смеси, °С	Предел прочности при сжатии при температурах			Водостойкость	Водостойкость при длит.вод онасыщ.
		20 °С	50 °С	0 °С		
155	150	4,1	1,2	10,4	0,94	0,86
	130	4,0	1,2	10,5	0,92	0,83
	120	4,0	1,1	11,0	0,89	0,81
	110	3,8	1,2	11,1	0,88	0,78
	100	3,8	1,1	11,4	0,86	0,76
140	140	4,0	1,2	10,5	0,94	0,85
	130	4,0	1,1	10,6	0,90	0,83
	120	3,9	1,1	11,1	0,87	0,80
	110	3,8	1,2	11,3	0,87	0,78
	100	3,8	1,1	11,2	0,85	0,76
130	130	4,0	1,2	10,8	0,89	0,80
	120	3,9	1,1	11,0	0,88	0,78
	110	3,8	1,1	11,2	0,86	0,76
	100	3,8	1,2	11,4	0,85	0,75
Требования ГОСТ 9128-2013 для асфальтобетона типа Б II марки		не менее 2,2	не менее 1,0	не более 12	Не менее 0,85	Не менее 0,75

Из результатов исследований видно, что при снижении температуры приготовления асфальтобетонной смеси до 130 °С и температуры уплотнения горячей смеси до 100 °С за счет

использования добавки характеристики полученного теплого асфальтобетона удовлетворяют требованиям ГОСТ для горячего асфальтобетона.

Причем, уменьшение прочности при 20 и 50 °С и повышение прочности при 0 °С при снижении температуры приготовления и уплотнения незначительно и составляет не более 10%.

Более заметно изменяется водостойкость образцов асфальтобетона, причем этот показатель при всех температурах исследования не опускался ниже 0,85, а при длительном водонасыщении – ниже 0,75.

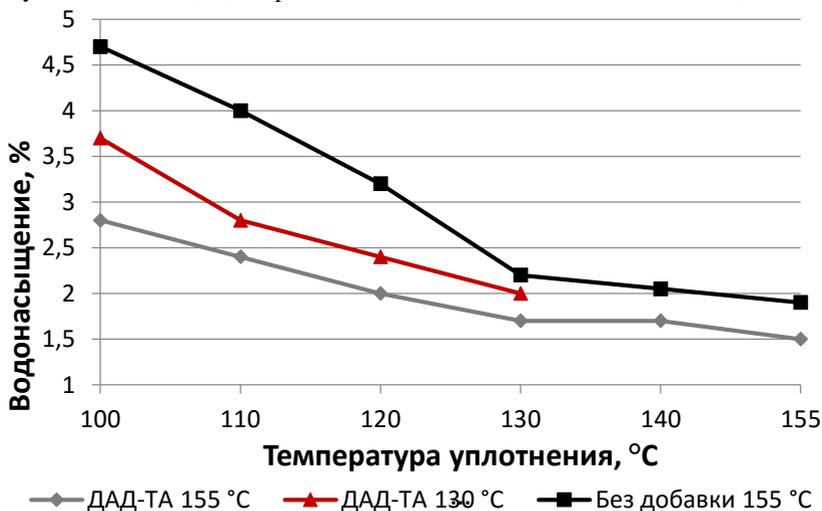


Рисунок 1 – Изменение водонасыщения в зависимости от температуры приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси

Особенно наглядно влияние добавки можно проследить по изменению водонасыщения образцов асфальтобетона, полученных из смеси, приготовленной и уплотненной при различных температурах.

Из рисунка видно, что использование добавки ДАД-ТА позволяет снизить водонасыщение образцов асфальтобетона, особенно при температуре ниже 130 °С. Например, асфальтобетонная смесь, приготовленная без добавки при температуре 155 °С, имеет водонасыщение 2% при температуре уплотнения 145 °С, а с температуропонижающей добавкой – при температуре уплотнения 120 °С. Использование добавки позволяет достигнуть такой же плотности

при снижении температуры приготовления и уплотнения смеси до 130 °С.

Одной из проблем, возникающих в процессе укладки горячих асфальтобетонных смесей, является недоуплотнение их вследствие быстрого остывания. В связи с этим представляло интерес исследование уплотняемости теплой асфальтобетонной смеси, приготовленной с использованием добавки ДАД-ГА, по сравнению с горячей смесью без добавки.

Уплотняемость смеси исследовалась на гираторе фирмы Соорег. Приготовление контрольной асфальтобетонной смеси (без добавки) и опытной (с добавкой) производилось при температуре 155 °С, уплотнение смеси без добавки – при температуре 155 °С, с добавкой – 120 °С до достижения одинаковой плотности.

Таблица 2 – Уплотняемость асфальтобетонной смеси

Образец	Число оборотов	Итоговая плотность, г/см ³
Без добавки (155 °С)	342	2380,45
С добавкой (120 °С)	269	2380,96

Результаты, представленные в таблице 2, свидетельствуют о лучшей уплотняемости смеси с добавкой ДАД-ГА даже при снижении температуры уплотнения на 35 °С, то есть одинаковая плотность образцов за счет использования температуропонижающей добавки достигается при меньшем количестве оборотов гиратора.

Таким образом, установлен характер влияния разработанных добавок на физико-механические характеристики асфальтобетона при различных температурах их использования, что позволило обосновать снижение температуры приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси за счет применения добавок серии ДАД-ГА. Это будет способствовать продлению сезона дорожного строительства и уменьшению загрязнения окружающей среды.

Показано, что при использовании добавки улучшается уплотняемость асфальтобетонной смеси при снижении температуры приготовления и уплотнения, что позволит сократить материально-технические затраты при укладке дорожного покрытия.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08027 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Радовский Б.С. Прогресс технологий производства теплого асфальтобетона в США // Автомобильные дороги. 2011. №8. С. 29-39.
2. Onfield Jean-Noel. Enrobes tiedes: Pourquoi vont-ils se substituer aux enrobes a chaud? // Route actual. 2009. № 178. С. 26-28.
3. Радовский Б.С. Технологии нового теплого асфальтобетона в США // Дорожная техника. 2008. №8. С. 24-28.
4. Xie Zhaoxing, Shen Junan, Fan Wenzhong, Wang Lili. LABORATORY INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WARM MIX ASPHALT (WMA) ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF WMA USED IN CHINA // Journal of Testing and Evaluation. Vol. 42. Issue III. 2014. (Лабораторные исследования влияния добавок для теплых асфальтобетонных смесей на свойства теплого асфальтобетона в Китае)
5. Arun S. Bagi, Vijay Gomarshi, Shivaraj B.S. MIX DESIGN PROPERTIES AND MOISTURE SENSITIVITY CHARACTERISTICS OF DENSE BITUMINOUS MACADAM MIXES MODIFIED WITH REDISET, A WARM MIX ADDITIVE // International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol. 03 Issue 07. 2014. pp. 159-163. (Проектирование свойств и исследование водостойкость плотного асфальтобетона, модифицированного добавкой REDISET для теплых асфальтобетонных смесей)
6. Dheeraj Kumar N., Varadraj N.K. DENSITY AND COMPACTION CHARACTERISTICS OF WMA USING ADDITIVES // International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol. 03 Issue 06. 2014. pp. 603-607 (Изучение плотности и уплотнения теплых асфальтобетонных смесей с использованием добавок).
7. Prowell B., Hurley G., Crews E. Field performance of warm-mix asphalt at national center for asphalt technology test track //Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2015. pp. 96-109.
8. Hainin M. R. et al. An Overall Review: Modified Asphalt Binder Containing Sasobit in Warm-Mix Asphalt Technology //Jurnal Teknologi. 2015. T. 73. №. 4.
9. Li X. et al. SELECTING WARM MIX ASPHALT ADDITIVES BY THE PROPERTIES OF WARM MIX ASPHALT MIXTURES--CHINA EXPERIENCE //Baltic Journal of Road & Bridge Engineering. 2015. T. 10. №. 1.
10. Abreu L. et al. Evaluation of foamed bitumen efficiency in warm asphalt mixtures recycling //WASTES 2015–Solutions, Treatments and Opportunities: Selected papers from the 3rd Edition of the International Conference on Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities, Viana Do Castelo, Portugal, 14-16 September 2015. CRC Press, 2015. С. 1.

11. Rodríguez-Alloza A. M. et al. Hybrid input–output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Т. 90. С. 171-182.
12. Ядыкина В.В., Гридчин А.М., Холопов В.С., Траутвайн А.И. Добавка в асфальтобетонные смеси для продления сезона дорожного строительства // *Фундаментальные исследования*. 2014. №11. Ч. 11. С. 2395-2399.
13. Yadykina V.V. Increasing the Reactivity of the Mineral Powders by Modifying / Yadykina V.V., Gridchin A.M., Trautvain A.I., Khoroshikh A.S. // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 749. P. 348-352 (<http://www.scientific.net/AMM.749.348.pdf>)

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СИСТЕМАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИОННО- ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

yrndo@mail.ru

Ястребинский Р.Н., канд. физ.-мат. наук, доц.,
Павленко В.И., д-р техн. наук, проф.,
Матюхин П.В., канд. техн. наук, доц.,
Павленко З.В., канд. техн. наук, доц.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Рассмотрены структурно-фазовые превращения в двухкомпонентных железооксидных системах при высокотемпературном воздействии, на примере трехвалентного оксида железа и оксидов кальция и кремния, являющимися одними из основных компонентов цементных связующих. Структурно-фазовые превращения в Fe_2O_3 в широком температурном интервале способствовали интенсификации твердофазового взаимодействия Fe_2O_3 с компонентами композиционной смеси: влияние кальцита на структуру Fe_2O_3 проявлялось при 700°C , это приводило к образованию монокальциевого феррита, который по мере обогащения системы СаО ($800\text{-}960^\circ\text{C}$) переходил в двухкальциевый феррит. Ионы кальция способствовали стабилизации $[\text{Fe}^{+3}\text{O}_4]$ - координационной формы в интервале $500 - 1000^\circ\text{C}$, структура образующихся ферритов была неоднородной; в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ происходило образование твердого раствора внедрения гематита в кремнезем в широком температурном интервале ($900\text{-}1300^\circ\text{C}$). До 1300°C в данной системе химический соединений не обнаружено.

Ключевые слова: оксиды железа, гематит, двухкомпонентные системы, оксид кальция, оксид кремния, термическое воздействие, структурно-фазовые превращения

Для обеспечения безопасности эксплуатации ядерных реакторов АЭС и ядерных энергетических установок (ЯЭУ) требуются материалы не только с высокой поглощающей способностью гамма- и нейтронного излучения, но и возможностью длительной эксплуатации при высоких радиационно-термических нагрузках без изменения физико-

механических и радиационно-защитных свойств. В этом направлении широкое применение нашли железоксидные материалы на основе обогащенных железорудных концентратов КМА, обладающие за счет повышенного содержания атомов железа высокими радиационно-защитными свойствами по отношению к гамма излучению [1].

Другой особенностью оксидов железа является их реакционно-способность и возможность образования новых фаз с компонентами цементных связующих радиационно-защитных композитов при радиационно-термическом воздействии, за счет разогрева материала при поглощении высоких доз гамма излучения. Это свойство железоксидных материалов наиболее ценно при создании несущих конструкционных материалов радиационной защиты, подверженных одновременному воздействию физико-механических и термических нагрузок [2].

В связи с этим, в данной работе авторами рассмотрены структурно-фазовые превращения в двухкомпонентных железоксидных системах при высокотемпературном воздействии, на примере трехвалентного оксида железа и оксидов кальция и кремния, являющимися одними из основных компонентов цементных связующих.

Для исследований использовался высушенный при 110°C оксид железа в виде альфа формы гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с содержанием основного компонента 98,3% и межплоскостным расстоянием 2,706; 2,522; 2,212; 1,845; 1,692; 1,48; 1,49 Å. С учетом состава радиационно-защитного композита рассмотрены соотношения $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{CaO}=1:4$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2=1:8$. Исследования проводились методами рентгено-фазового анализа (РФА), ИК-спектроскопии и термогравиметрическим методом (ДТА и ДТГ).

Твердофазовое взаимодействие в смеси начиналось около 500°C. Интенсивность отражений в РФА для кальцита (d/n, Å 2,501; 2,287; 2,094; 3,038) и гематита (d/n, Å 2,522; 1,475) снижалась, а потеря массы смеси при 500°C возрастала. В связи с тем, что диссоциация кальцита при этой температуре практически не наблюдается [3], потеря массы смеси может быть вызвана началом протекания реакции образования монокальциевого феррита:



Термодинамически реакция (1) в указанных условиях возможна ($\Delta G_{500} = -34,5$ КДж/моль) и с повышением температуры вероятность ее возрастает.

Анализ ИК-спектров подтверждает протекание твердофазового взаимодействия в смеси при 500°C и существенное влияние кальцита на структуру Fe_2O_3 . Так полосы поглощения при 520 и 450 см^{-1} ,

наблюдаемые для термообработанного при 500°C гематита, смещались соответственно до 540 и 475 см^{-1} , что связано с уменьшением межатомных расстояний связи Fe-O (рис. 1).

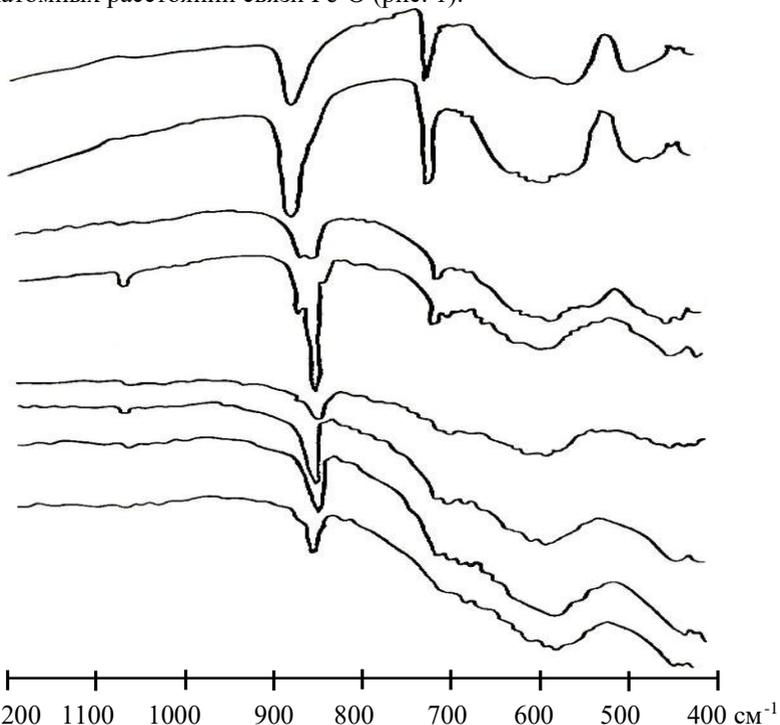


Рисунок 1 – ИК-спектры системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO}$: 1- 500°C; 2 - 600°C; 3 - 700°C; 4 - 800°C; 5 - 900°C; 6 - 1000°C; 7 - 1100°C; 8 - 1200°C

Обращает на себя внимание тот факт, что взаимодействие оксида железа с кальцитом происходило в период полиморфного превращения $\gamma \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (500°C).

При температуре выше 650 °C начинался процесс диссоциации кальцита, который интенсивно протекает при 800-900 °C. По данным ДТА максимальная скорость диссоциации CaCO_3 наблюдается при 880 °C (рис.2) и завершается при 960°C. При этом полоса поглощения $[\text{CO}_2]$ при 870 см^{-1} отсутствует.

Реакции образования ферритов кальция значительно интенсифицировались в интервале 800-1000 °C. В этом же интервале

температур происходило изменение окраски образцов от красно-бурой до светло-коричневой.

По данным ИК-спектроскопии ферритные фазы, полученные при 800-900 °С неоднородны, с разупорядоченной структурой, что наблюдалось до 1000°С. При более высоких температурах (1100-1200°С) структура ферритов становилась более однородной.

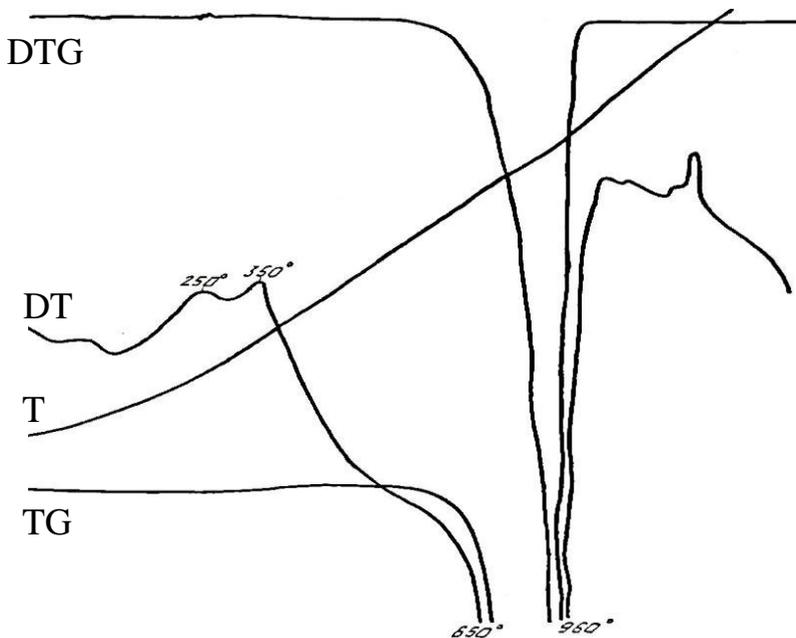


Рисунок 2 – Дифференциально-термический анализ Fe₂O₃-CaO

Гематит полностью вступал в химическое взаимодействие с кальцитом и оксидом кальция при 1000-1100°С. Повышение температуры до 1200 С приводило к возможной ферритизации системы - выделению Fe₂O₃. На кривой ДТА в области 1150-1200°С наблюдался эндотермический эффект, который может быть вызван инконгруэнтным плавлением остатка CaFe₂O₄, с выделением гематита [4]:



Таким образом, в системе CaCO₃-Fe₂O₃ образование ферритов кальция происходит в широком температурном интервале от 500 до 1100°С (табл.1).

Таблица 1 – Схема процессов, происходящих в системе $\text{CaCO}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ при нагревании

Процессы	Температура, °С
Начало твердофазового взаимодействия	500
Полиморфное превращение $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	500
Интенсивное образование монокальциевого феррита	500-700
Начало диссоциации CaCO_3	650
Магнитное превращение $\gamma \leftrightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	660
Максимальная скорость диссоциации CaCO_3	880
$\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{CaFe}_2\text{O}_4$	700-800
$2\text{CaCO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5 + \text{CO}_2$	700-800
$2\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	800-1000
Полное химическое связывание Fe_2O_3	1100

Первичным продуктом являлся монокальциевый феррит CaFe_2O_4 , который образовывался в интервале 500-700°С в результате взаимодействия Fe_2O_3 с кальцитом. В интервале 700-800°С происходило взаимодействие CaO с Fe_2O_3 с образованием CaFe_2O_4 . При обогащении системы CaO (800-1000°С) синтезировался двухкальциевый феррит $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$.

В интервале 500-1000°С структура ферритов неоднородна, имелись $[\text{FeO}_4]$ и $[\text{FeO}_6]$ -группировки с преобладанием тетраэдрической координационной формы. В интервале 1000-1200°С структура ферритов становилась более упорядоченной.

Система $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ имеет ограниченное самостоятельное значение, но очень важна как составная часть многокомпонентных систем. В исследуемой системе нет химических соединений и взаимодействие компонентов отсутствует [5]. В ней не образуется заметное количество твердых растворов.

Представляет интерес при помощи ИК-спектроскопии проследить изменение структуры кварца в присутствии гематита в процессе термообработки компонентной смеси.

В исходном спектре наблюдались полосы поглощения при 1170, 1075 см^{-1} , дублетная полоса 800-780 см^{-1} , полосы при 690, 525 и 460 см^{-1} , характерные для валентных и деформационных колебаний Si-O-Si и O-Si-O связей в кремнекислородном тетраэдре $[\text{SiO}_4]$. Полосу при 780 см^{-1} приписывают [6] наличию гексагональных колец из тетраэдров $[\text{SiO}_4]$, характерных для β -кварца (рис. 3).

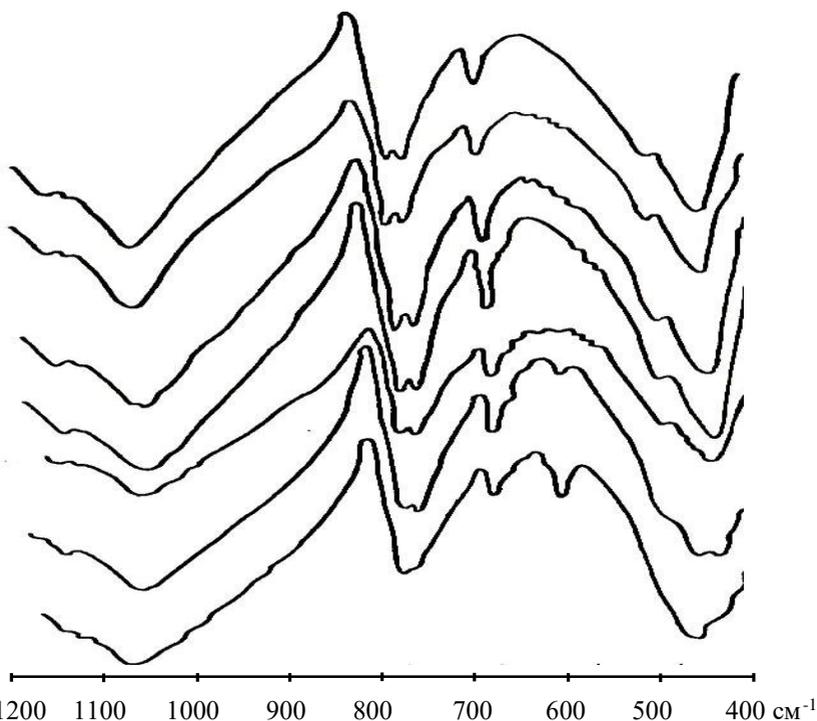


Рисунок 3 – ИК-спектры образцов системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$: 1 – 500 °С; 2 - 700 °С; 3 – 900 °С; 4 - 1000°С; 5 – 1100 °С; 6- 1200°С; 7 - 1300°С

Структурные изменения силоксановой связи происходили при температуре выше 500°С. С одной стороны, это вызвано полиморфным превращением $\beta \leftrightarrow \alpha$ кварца при 575°С (эндозффект на кривой ДТА рис. 4), которое сопровождается заметным объемным эфффектом и увеличением размеров пустот в структуре кварца. С другой стороны, в интервале 500-900°С происходили активные структурно-фазовые и магнитные перестройки атомов железа в Fe_2O_3 . Так как структурные перестройки в кварце не завершались при 575°С и продолжались при более высоких температурах, это должно приводить к проявлению эфффекта Хедвала, связанного с повышенной реакционной способностью твердых тел во время полиморфных превращений.

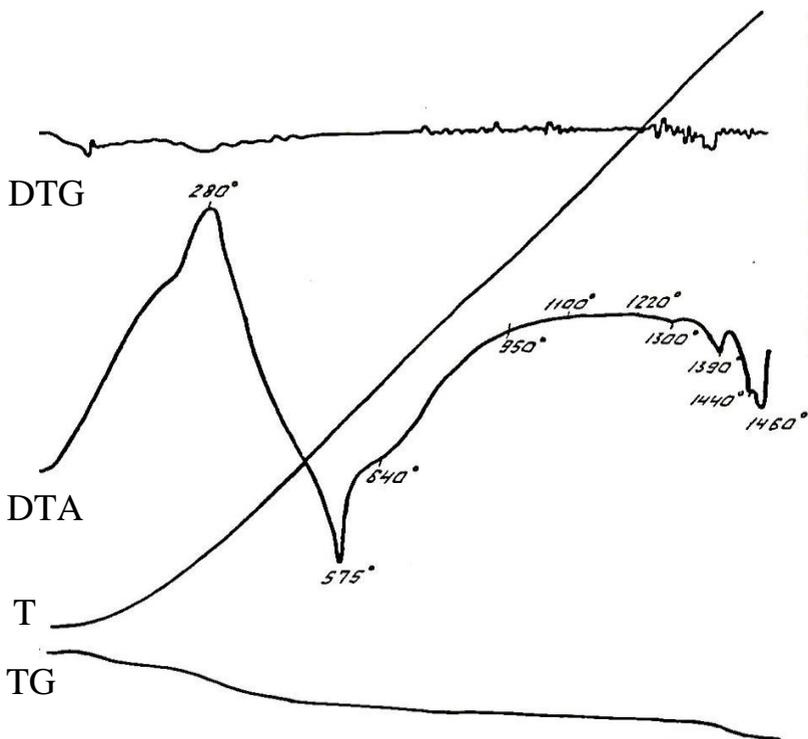
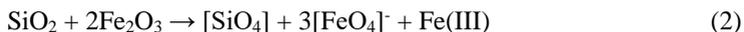


Рисунок 4 – Дериwатограмма образца системы Fe₂O₃-SiO₂

В результате проведенных исследований установлено, что определенное твердфазовое взаимодействие Fe₂O₃ с SiO₂ имело место. Так в интервале 900-1300°С происходило уменьшение интенсивности полосы поглощения при 780 см⁻¹, а основная полоса мостиковых колебаний связей Si-O в области 1100-1000 см⁻¹ (максимум поглощения 1075 см⁻¹) уширялась (рис. 3).

Зафиксированные изменения в ИК-спектре смеси могут быть результатом миграции ионов Fe(III) из обменных позиций оксида железа в структуру кремнезема, так как в индивидуальном кремнеземе отмеченные изменения в ИК-спектре не обнаружены. Вхождение ионов Fe(III) в силикатную сетку возможно как в вакантные позиции в структуре нагретого кварца, так и в позицию [SiO₄] - тетраэдров, замещая их на [FeO] - тетраэдры. В качестве компенсатора заряда тетраэдра [FeO₄] может выступать шестикоординированный ион Fe(III).

Более уширенный характер полосы в области 1100-1000 см⁻¹ может указывать на образование железосодержащих комплексов-кластеров. Предполагаемый кластер может быть построен и вписан в силикатную сетку по схеме:



Кластерообразованию могут способствовать отмеченные в гематите при 850°C структурные перестройки атомов железа в [FeO₆]-позиции.

В интервале 900-1000°C максимум основной полосы поглощения 1075 см⁻¹ смещался в высокочастотную область к 1090 см⁻¹ т.е., согласно [7], происходило возрастание степени полимеризации кремнекислородного каркаса. При 1100-1300°C в области 500-400 см⁻¹ полоса поглощения уширялась; происходило формирование полос при 475-420 см⁻¹, которые указывали на различную симметрию ионов Fe(III) в [FeO₆]-октаэдрах. Кроме того, в ИК-спектре смеси, термообработанной при 700-1100°C, зафиксированы слабые полосы поглощения в области 650-550 см⁻¹, которые относят к тетраэдрическим группам железа [FeO₄]. При этом линия 580 см⁻¹ характерна для магнетита. При высоких температурах магнетит не проявлялся.

Таблица 2 – Схема процессов, происходящих в системе Fe₂O₃-SiO₂ при нагревании

Процессы	Температура, °C
Полиморфное превращение $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	500
Полиморфное превращение кварца $\beta \leftrightarrow \alpha\text{-SiO}_2$	575
Магнитное превращение маггемита $\gamma \leftrightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	660
Переход $\gamma \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	760, 850
Образование активного комплекса-кластера $\text{SiO}_2 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow [\text{SiO}_{4/2}]^0 + 3[\text{FeO}_{4/4}]^- + \text{Fe(III)}$	500-900
Взаимодействие кластера с кварцем	700-900
Образование магнетита	1000-1100
Образование кристобалита	1100-1300
Внедрение $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в SiO ₂ (кр.) с одновременным изменением их кристаллографических параметров	1200-1300

Начиная с 1100°C происходило формирование кристобалита (полоса поглощения 625 см⁻¹ и отражение d/n=4,04 Å). Одновременно с формированием кристобалита шло уменьшение содержания Fe₂O₃ (основная линия 3,71 Å в РФА уменьшалась ~в два раза). Следовательно, можно предположить, что Fe₂O₃ выполнял

модифицирующую роль при формировании кристобалита и образовании твердых растворов.

Таким образом, в исследуемой системе установлено, что твердофазовые взаимодействия между Fe_2O_3 и SiO_2 приводили к образованию твердых растворов внедрения гематита в кремнезем в широком температурном интервале (900-1300°C) (табл. 2). Подтверждено, что до 1300°C в данной системе химических соединений не обнаружено. Формирование кристобалита для данного состава смеси происходило выше 1000°C с одновременным уменьшением содержания Fe_2O_3 , что подтверждает образование твердых растворов и указывает на модифицирующую роль оксида железа.

Выводы

Исследованы структурно-фазовые превращения в двухкомпонентных железооксидных системах при высокотемпературном воздействии, на примере трехвалентного оксида железа и оксидов кальция и кремния, являющимися одними из основных компонентов цементных связующих. С учетом состава радиационно-защитного композита рассмотрены соотношения $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{CaO}=1:4$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2=1:8$.

Структурно-фазовые превращения в Fe_2O_3 в широком температурном интервале способствовали интенсификации твердофазового взаимодействия Fe_2O_3 с компонентами композиционной смеси: влияние кальцита на структуру Fe_2O_3 проявлялось при 700°C, это приводило к образованию монокальциевого феррита, который по мере обогащения системы CaO (800-960°C) переходил в двухкальциевый феррит. Ионы кальция способствовали стабилизации $[\text{Fe}^{+3}\text{O}_4]$ -координационной формы в интервале 500 - 1000 °C, структура образующихся ферритов была неоднородной; в системе Fe_2O_3 - SiO_2 происходило образование твердого раствора внедрения гематита в кремнезем в широком температурном интервале (900-1300 °C). До 1300 °C в данной системе химических соединений не обнаружено.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08059 «р_фи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Ястребинская А.В., Черкашина Н.И., Карнаухов А.А. Радиационно-стойкий конструкционный композиционный материал для защиты атомных реакторов АЭС и хранилищ среднеактивных РАО // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). 2015. №2(96). С. 73-76.
2. Поспелов В.П., Миренков А.Ф., Покровский С.Г. Бетоны радиационной защиты атомных электростанций / М: ООО «Август-Борг», 2006. 652 с.
3. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В. Композиционный материал для защиты от гамма излучения / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011, № 3. С. 15–18.
4. Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Павленко З.В. Использование модифицированного железорудного сырья для получения конструкционной биологической защиты атомных реакторов // Успехи современного естествознания. 2015. №9, Ч.3. С.507-510.