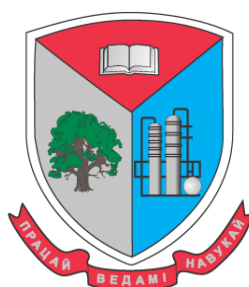


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»



ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА

**Материалы докладов
85-ой научно-технической
конференции профессорско-преподавательского
состава, научных сотрудников и аспирантов
(с международным участием)**

1-13 февраля 2021 года

Минск 2021

УДК 661.(06)(07.034.44)

Химическая технология и техника : материалы 85-ой науч.-технич. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–13 февраля 2021 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов; УО «БГТУ». – Минск : БГТУ, 2021. – 286 с.

Сборник составлен по материалам докладов научно-технической конференции сотрудников Белорусского государственного технологического университета, в которых отражены новые успехи и достижения в таких областях исследований, как охрана окружающей среды, разработка способов утилизации различных отходов, использование осадков сточных вод гальванических производств ведущих предприятий Беларуси, получение новых керамических материалов и создание высокоэкономичных источников общего освещения на основе светодиодов, нетрадиционные методы получения некоторых твердых растворов и изучение их физико-химических свойств, принципы синтеза роботизированного комплекса для процессов термической обработки металла и многое другое. Сборник предназначен для работников различных отраслей народного хозяйства, научных сотрудников, специализирующихся в соответствующих областях знаний, аспирантов и студентов ВУЗов.

Рецензенты:

Климош Ю.А., декан факультета ХТиТ, канд. техн. наук;
Кузьменков М.И., проф. кафедры ХТВМ, д-р техн. наук;
Францкевич В.С., зав. кафедрой МиАХиСП, канд. техн. наук;
Черник А.А., зав. кафедрой ХТЭХПиМЭТ, канд. хим. наук;
Курило И.И., зав. кафедрой ФКиАХ, канд. хим. наук;
Карпович Д.С., зав. кафедрой АППиЭ, канд. техн. наук;
Лихачева А.В., зав. кафедрой ПЭ, канд. техн. наук

Главный редактор Войтов И.В., ректор, д-р техн. наук, профессор

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Кузьменков М.И., Лукаш Е.В., Шалухо Н.М.</i> Получение керамзитопенобетона плотностью 400-600 кг/м ³ для производства железобетонных панелей.....	9
<i>Зарапин В.Г., Матвейко Н.П.</i> Фибра с микрорельефной текстурой для дисперсного армирования.....	11
<i>Терещенко И.М., Павлюкевич Ю.Г., Войтов И.В., Шетько С.В., Войтова А.В.</i> Использование отсевов гранитоидных пород Микашевичского месторождения в производстве непрерывного волокна.....	14
<i>Дяденко М.В., Левицкий И.А., Петух Н.М.</i> Разработка составов стекол для защитной оболочки жесткого оптического волокна.....	18
<i>Дяденко М.В., Левицкий И.А., Быченко Д.С., Сидоревич А.Г.</i> Изучение влияния оксидов TiO ₂ , ZrO ₂ , La ₂ O ₃ на электрофизические характеристики щелочных боросиликатных стекол.....	21
<i>Левицкий И.А., Жукова И.И., Комар М.В.</i> Апробация технологии получения клинкерного кирпича в условиях производства.....	24
<i>Левицкий И.А., Дяденко М.В.</i> Взаимосвязь фазового состава, структуры и свойств биоцидных глазурных покрытий.....	27
<i>Габалов Е.В.</i> Получение фосфата бора.....	30
<i>Павлюкевич Ю.Г., Ларионов П.С., Папко Л.Ф., Трусова Е.Е., Кравчук А.П.</i> О химической устойчивости стеклокристаллических пропантов.....	33
<i>Кузьменков М.И., Сакович А.А., Кузьменков Д.М., Вовк В.И.</i> Синтетический гипс – альтернатива импортному природному сырью.....	35
<i>Шалухо Н.М., Кузьменков М.И., Лукаш Е.В., Шинкевич М.С., Булай Т.В.</i> Исследование истираемости и химической стойкости серосодержащего покрытия для бетона.....	37
<i>Анкуда М.К., Кузьменков М.И.</i> Термодинамический анализ влияния солевых минерализаторов на процесс формирования цементного клинкера.....	39
<i>Баранцева С.Е., Климош Ю.А., Манкевич С.С.</i> Оценка возможности использования попутных полезных ископаемых Новодворского месторождения базальтов и туфов.....	41
<i>Костик Е.А., Левицкий И.А.</i> Металлизированные глазури для художественной керамики.....	44
<i>Турдиалиева Ш.И.</i> Упаренная экстракционная фосфорная кислота и ее физико-химические свойства.....	47
<i>Володин В.И.</i> Воздухоподогреватели промышленной печи.....	50
<i>Павлечко В.Н.</i> Сравнение опытных и расчетных давлений радиального вентилятора.....	53
<i>Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е.</i> Гидродинамика и эффективность регулярно-структурированных зигзагообразных насадок.....	56
<i>Петров О.А., Козловский В.И.</i> Компьютерное моделирование статических кавитационных эмульгаторов.....	58
<i>Черненко Д.С., Боровский Д.Н.</i> Анализ движения загрузки в планетарной мельнице.....	62

<i>Гарабажиу А.А., Боровский Д.Н., Исаченков В.С., Клоков Д.В.</i> Перспективная конструкция роторно-центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих материалов.....	64
<i>Ланкин Р.И., Францкевич В.С.</i> Влияние технологических параметров барабанного гранулятора на высоту подъема материала.....	67
<i>Высоцкая Н.А., Францкевич В.С.</i> Влияние влагосодержания шихты на качественные характеристики гранул комплексных удобрений.....	70
<i>Францкевич В.С., Дорогокупец А.С.</i> Модель движения измельченного материала в сепарационном устройстве среднеходной мельницы.....	73
<i>Ковалева А.А., Федарович Е.Г., Чиркун Т.Я.</i> Экспериментальное определение рациональных параметров процессов дробления твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий в щековой дробилке.....	76
<i>Кузьмин В.В., Францкевич В.С., Лепесбаев И.Б.</i> Экономическая эффективность применения энергосберегающих устройств для циклонов в промышленности Республики Узбекистан.....	78
<i>Санько А.Д., Францкевич В.С.</i> Особенности выбора конструкции песковой насадки гидроциклонов при сгущении суспензии в производстве калийных удобрений.....	81
<i>Калишук Д.Г., Рахматуллаев И.С., Саевич Н.П., Ниёзов Ж.Р.</i> Исследование гидравлического сопротивления сухих тарелок со стационарными клапанами.....	84
<i>Саевич Н.П., Калишук Д.Г., Усманов Ы.А., Ниёзов Ж.Р., Рахматуллаев И.С.</i> Гидродинамические параметры работы циркуляционного контактного подогревателя.....	87
<i>Тошатов Л.Ш., Назарханов И.Б., Левданский А.Э., Опимах Е.В.</i> Валидация модели для процесса образования пузырьков на затопленном отверстии пневматического аэратора.....	90
<i>Назарханов И.Б., Тошатов Л.Ш., Левданский А.Э., Опимах Е.В.</i> Оптимизация конструктивных и режимных параметров пневматического аэратора.....	93
<i>Ковалева А.А., Федарович Е.Г., Левданский А.Э.</i> Определение состава и условий обработки продуктов пиролиза резинотехнических изделий.....	96
<i>Ярмолик С.В., Ковалева А.А., Федарович Е.Г., Левданский А.Э., Абдуназаров Ф.А., Кенгбоев С.А.</i> угли Исследование процесса классификации твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий в гравитационно-роторном пневмокласификаторе.....	99
<i>Ковалева А.А., Федарович Е.Г., Абдуназаров Ф.А., Кенгбоев С.А. угли, Левданский А.Э.</i> Исследование влияния технологических параметров на процесс помола твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий в ударно-центробежной мельнице.....	101
<i>Ковалева А.А., Федарович Е.Г., Левданский А.Э.</i> Исследование процесса классификации твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий в барабанном грохоте.....	104
<i>Левданский И.А., Левданский А.Э.</i> Разработка конструкции аппарата удаления поверхностной влаги механическим способом.....	107

<i>Поспелов А.В., Ветохин С.С., Романовский В.И.</i> Коррозия стали марки СтЗ в водном растворе озона и в хлорсодержащих дезинфицирующих растворах	110
<i>Шичкова Т.А., Степанова Л.И.</i> Особенности совместного химического осаждения меди и никеля борогидридом.....	112
<i>Костюк Н.Н., Дик Т.А.</i> Синтез ультрачистых хелатов самария (II) и (III).....	115
<i>Гвоздева Н.А., Радченко С.Л., Новикова Л.Н., Хмылко Л.И.</i> Ресурсосберегающая технология синтеза фосфатных керамических пигментов.....	116
<i>Евстигнеева В.П., Валько Н.Г., Богдевич Д.И.</i> Исследование микротвердости композиционных покрытий Ni/Au, сформированных в поле ионизирующего излучения.....	119
<i>Матыс В.Г., Тарасевич А.В., Поплавский В.В., Мисюкевич С.С., Ашуйко В.А.</i> Показатели защитной способности Ti- и Zr-содержащих конверсионных покрытий на гальваническом цинке.....	121
<i>Малашонок И.Е., Сальчиц О. И.</i> Организация и управление самостоятельной работой студентов при изучении химических дисциплин в условиях пандемии.....	125
<i>Яскельчик В.В., Черник А.А.</i> Электролитическое получение порошков латуни.....	128
<i>Родионова П.С., Кубрак П.Б., Яскельчик В.В.</i> Электрохимическое полирование титана в глицериновых растворах минеральных кислот.....	131
<i>Кубрак П.Б., Яскельчик В.В., Кравченко В.М., Тромза И.А.</i> Электрохимическое полирование стали с высоким содержанием углерода в растворах на основе органических растворителей.....	135
<i>Пянко А.В., Бачко О.П., Кубрак П.Б., Алисиенок О.А., Черник А.А.</i> Электрохимическое осаждение композиционных покрытий на основе сплава Sn-Ni.....	138
<i>Жилинский В.В., Чаевский В.В., Филипович Т.Н.</i> Электрохимическое формирование композитных катодов-мишеней для вакуумного напыления.....	140
<i>Юхно Е.К., Петров Г.С., Красуцкая Н.С.</i> Низкотемпературные магнитные свойства твердых растворов на основе индата лантана.....	144
<i>Богдан Е.О., Павлюкевич Ю.Г., Черник А.А., Гундилович Н.Н., Ларионов П.С.</i> Основные направления переработки пыли металлургического производства.....	146
<i>Красуцкая Н. С. , Глинская А. А. , Юхно Е. К.</i> Высокотемпературные термоэлектрики на основе производных слоистого кобальтита натрия.....	149
<i>Зиневич Д. В., Поддубская К.В., Глинская А.А., Великанова И.А., Дудчик Г.П.</i> Свойства твердых растворов феррита висмута, частично замещенных катионами лантана и празеодима.....	151
<i>Журавлева Я.Ю., Клындюк А.И., Чижова Е.А.</i> Синтез, структура и свойства твердых растворов Nd(Ba,Sr)(Fe,Co,Cu) ₂ O _{5+δ}	154
<i>Чижова Е.А., Латыпов Р.С., Сидорик И.Д., Шевченко С.В.</i> Термоэлектрические свойства композитов Ca ₃ Co ₄ O _{9+δ} /Cu, Ca ₃ Co ₄ O _{9+δ} / Cu ₂ O.....	157
<i>Осипенко М.А., Потихонин Д.Е., Харитонов Д.С., Курило И.И.</i> Изучение коррозионного поведения сплава WE43 в присутствии перманганата калия.....	160

<i>Богомазова Н.В., Браим А.О., Галковский Т.В., Жарский И.М.</i> Оптические свойства пленок SnS _x , полученных химическим и электрохимическим методом.....	162
<i>Новикова Л.Н., Ашуйко В.А., Мартинкевич А.А. Урбанович Н.И., Барановский К.Э.</i> Антикоррозионные свойства красок, полученных из цинковой пыли отхода горячего цинкования.....	164
<i>Залыгина О.С., Латош Е. С.</i> Использование скопа в качестве выгорающей добавки при производстве керамического кирпича.....	170
<i>Залыгина О.С., Лисай Е.А.</i> Подбор эффективных коагулянтов и флокулянтов для очистки сточных вод ОАО «Керамин».....	173
<i>Залыгина О.С., Чепрасова В.И., Беляева О.Д.</i> Отработанные электролиты хромирования как потенциальное сырье для производства пигментов.....	176
<i>Шибека Л.А., Бельская Т.Г.</i> Фитотоксические свойства водной вытяжки древесной золы.....	179
<i>Шибека Л.А., Косевич Е.В.</i> Применение древесных отходов для очистки промывных сточных вод гальванического производства.....	181
<i>Журавская Н.Е., Мехед Б.А, Журавский Д.А.</i> Проблемы биоповреждения и его влияние	183
<i>Марицунь В.Н., Сапон Е.Г.</i> Проблемы обращения с осадками очистных сооружений канализации в Республике Беларусь.....	186
<i>Марицунь В.Н.</i> Анализ нормативного правового регулирования обращения с осадками очистных сооружений канализации в Республике Беларусь.....	188
<i>Дубина А.В., Гукасов В.Р.</i> Усовершенствование технологии очистки выбросов деревообрабатывающих производств от формальдегида.....	191
<i>Дубина А.В., Комаров М.А., Деткова Т.И., Романовский В.И.</i> Технология переработки отходов РПУП «Завод газетной бумаги».....	193
<i>Лихачева А.В., Елец И.Н., Дашкевич А.Н.</i> Биокomпостирование отходов растительного сырья на ЗАО «Витэк».....	195
<i>Лихачёва А.В., Розыкулыев Х.Д.</i> Система обращения с лабораторными отходами в Республике Беларусь.....	196
<i>Лихачёва А.В., Качинская Д.В.</i> Переработка железосодержащих отходов ОАО «Керамика».....	197
<i>Сапон Е.Г., Остапук О.Н.</i> Извлечение азота и фосфора из иловых вод в реакторе взвешенного слоя.....	198
<i>Войтов И.В., Еловик В.Л.</i> Влияние расположения точек контроля давления на энергопотребление насосных станций промышленного водоснабжения	200
<i>Войтов И.В., Гудинович П.М., Еловик В.Л.</i> Биохимические технологии очистки артезианских вод для нужд промышленного водоснабжения.....	203
<i>Коваль М.Г.</i> Способы очистки промышленных сточных вод природными сорбентами.....	206
<i>Меженцев А.А., Бурак Г.А., Гиринский В.В.</i> Способы утилизации фосфогипса.....	209
<i>Яглов В.Н., Гиринский В.В.</i> Материалы на основе фосфогипса, получаемые способом полусухого прессования.....	211
<i>Василевский А.С., Войтов И.В.</i> Исследование кальций-силикатсодержащих материалов для очистки сточных вод от фосфатов.....	213

<i>Оробей И.О., Сарока В.В., Анкуда М.А.</i> Использование эффекта Джекобсона-Вангснесса для измерения магнитных полей.....	214
<i>Оробей И.О., Сарока В.В., Карпович Д.С.</i> Измеритель концентрации для газовых смесей NH ₃ и CO.....	216
<i>Сарока В.В., Карпович Д.С., Овцов С.А., Хаусов И.А.</i> Планирование профилактических работ систем автоматизации с учетом начальных сроков возникновения отказов.....	219
<i>Александров О.И.</i> Адресно-регулируемое распределение потоков электроэнергии в межсистемных ЛЭП.....	223
<i>Бакаленко В.И., Барашко О.Г., Дейнека Т.А.</i> Настройка регуляторов в системах теплоснабжения.....	225
<i>Гринюк Д.А., Сухорукова И.Г., Алексеев В.Л., Шилин А.М.</i> Исследование колебаний лыжи под действием пневмоцилиндра.....	228
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Фоменко А.В., Жук Р.С.</i> Построение системы адаптивного управления процессом приготовления пива.....	231
<i>Гринюк Д.А., Сухорукова И.Г., Оробей И.О., Астапчик Е.В.</i> Управление объектами с нелинейной динамикой.....	234
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Сухорукова И.Г., Михновец А.С.</i> Варианты нахождения параметров ПИД-регулятора через цифровой.....	237
<i>Олиферович Н.М., Липский П.Л., Самбуров А.И., Карпович М.Д.</i> Организация сушки печатных плат в процессе их производства.....	240
<i>Гринюк Д.А., Бирюков А.Г., Давидовский Н.В., Дайнеко Т.А.</i> Настройка инвариантных систем для промышленных решений.....	243
<i>Лялько А.А.</i> Автоматический подбор коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора на основе минимального перерегулирования.....	246
<i>Лялько А.А.</i> Обзор алгоритмов адаптивной настройки коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов.....	248
<i>Подобед М.Ю., Сидорчик Д.Е., Стоцкий В.А.</i> Анализ изменения температуры наружного воздуха в г. Минске.....	251
<i>Подобед М.Ю., Сидорчик Д.Е., Стоцкий В.А.</i> Конструкции современных модульных автоматов.....	254
<i>Барашко О.Г., Бакаленко В.И.</i> Методика расчета общей эффективности оборудования при агрегировании информации в ERP-системах.....	256
<i>Барашко О.Г., Овсянников А.В.</i> Сравнение концепций традиционной и интеллектуальной ERP-систем.....	258
<i>Овсянников А.В., Барашко О.Г.</i> Фильтрация гистограммной оценки плотности вероятности на основе нечеткой принадлежности данных интервалу группирования.....	260
<i>Кобринец В.П., Коровкина Н.П., Пустовалова Н.Н.</i> Регулируемый электропривод как основа энергосбережения на промышленных предприятиях.....	263
<i>Клютко М.В.</i> Функциональные возможности робота-манипулятора DOBOT MAGICIAN.....	265
<i>Оробей И.О., Гринюк Д.А., Анкуда М.А., Олиферович Н.М.</i> Адаптивная фильтрация для обработки сигналов в режиме реального времени при получении информации от параметрического автодина.....	267
<i>Оробей И.О., Сарока В.В., Анкуда М.А.</i> Минимизация погрешностей измерений меточных ЯМР-расходомеров.....	270

<i>Шумский А.Н., Карпович Д.С., Хаусов И.А.</i> Анализ шумовых составляющих сигнала и борьба с ними.....	272
<i>Удрис Д., Карпович Д.С., Карпович М.Д., Михновец А.С.</i> Синтез систем управления с учетом характеристик исполнительных механизмов	273
<i>Тихомиров С.Г., Джумаев О.А., Карпович Д.С., Карпович С.С.</i> Использование каналов периодических измерений при синтезе инвариантных систем	274
<i>Сидорчик Д.Е., Подобед М.Ю., Королёв А.А., Шетько И.С.</i> Сравнительный анализ микроконтроллеров Arduino, STM32 и ESP32	275
<i>Овцов С.А., Рассылкин А.С., Демидова Г.Л., Кишкурно В.В.</i> Обработка результатов проверки работоспособности системы оптимального управления по критерию отклонения груза от вертикали	277
<i>Кушель А. Ю., Касач А. А., Кубрак П. Б., Жарский И. М., Курило И. И.</i> Исследование процесса осаждения оловянистой бронзы в импульсном режиме электролиза.....	278
<i>Соколовский А.Е.</i> Исследование особенностей термического разложения в системах триэтилалюминий-трипропиларсин и триэтилиндий-трипропиларсин.....	281
<i>Ковганко В. Н., Ковганко Н.Н., Слабко И.Н., Дорощук Д.С.</i> Синтез фторсодержащих биологически активных соединений ряда 3-арил-2-изоксазолинов.....	283

М. И. Кузьменков, проф., д-р техн. наук;
Е. В. Лукаш, канд. техн. наук;
Н. М. Шалухо, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМЗИТОПЕНОБЕТОНА ПЛОТНОСТЬЮ 400-600 кг/м³ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПАНЕЛЕЙ

В Республике Беларусь в жилищном строительстве в качестве стеновых ограждающих конструкций широко применяются железобетонные панели. Выпускаемые в настоящее время трехслойные панели состоят из наружных слоев, изготовленных из тяжелого бетона, и внутреннего теплоизоляционного слоя (например, полистиролбетона). Трехслойные стеновые панели, обладают большим термическим сопротивлением, однако недостатком этой конструкции являются значительные теплотери в зоне стыков и ребер жесткости. Поэтому даже применение высокоэффективных теплоизоляционных вкладышей не повышает существенно сопротивление теплопередаче стеновой панели. Однослойные стеновые панели отличаются простотой и технологичностью их конструктивного решения, низкой трудоемкостью производства, малым расходом металла [1].

Наиболее эффективным способом улучшения структуры, повышения однородности и долговечности керамзитобетона при меньшей его объемной массе является поризация бетонной смеси, т. е. получение керамзитопенобетона. Основная отличительная особенность технологии керамзитопенобетона по сравнению с технологией обычного керамзитобетона состоит в том, что из состава бетона исключается керамзитовый песок. Поризация смеси происходит благодаря введению технической пены при перемешивании смеси в бетоносмесителе [1].

В настоящее время в Республике Беларусь коэффициент термического сопротивления ограждающих конструкций составляет 3,2 м²·°С/Вт. Для сравнения, нормативные сопротивления теплопередаче для стен жилых зданий в Финляндии – 5,88; Норвегии, Швеции и Великобритании – 5,56; Германии – 3,57 и Бельгии – 2,0 (м²·°С)/Вт.

В Республике Беларусь на ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» в качестве одного из видов товарной продукции производится керамзит объемной массой 280–400 кг/м³, обладающий более лучшими показателями по теплосопротивлению. Повышение теплофизических свойств панелей приведет к снижению массы конструкций, что, в свою очередь, снизит нагрузку на несущие элементы зданий.

В рамках ГНТП «Строительные конструкции, материалы и технологии на 2016-2020 годы» были предусмотрены разработка и внедрение технологий производства и типовых конструктивных решений стеновых блоков и облегченных наружных панелей из керамзитопенобетона для зданий и сооружений. БНТУ, совместно с КУП «Брестжилстрой», ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» и УО БГТУ разработан состав керамзитопенобетона, конструктивные решения и технологии изготовления стеновых блоков и облегченных стеновых панелей с улучшенными теплофизическими свойствами.

Разработку состава керамзитопенобетона производили расчетно-экспериментальным путем с проведением опытных замесов. Керамзитопенобетонную смесь получали согласно технологии, разработанной авторами [2], на первой стадии которой готовили цементное тесто. На второй стадии поризовали связующее, вводя в цементное тесто белковый отечественный пенообразователь, разработанный ЧПУП «БелХимос» (г. Лепель), в оптимальном количестве. На третьей стадии в приготовленную пенобетонную смесь вводили предварительно насыщенный водой керамзитовый гравий при непрерывном смешивании в течение 60–90 с.

На основании выполненных исследований установлены основные физико-механические свойства экспериментальных образцов керамзитопенобетона, полученного на основе отечественного пенообразователя (ЧПУП «БелХимос»): марка по плотности D500, класс по прочности – В1, водопоглощение по массе – 16%, теплопроводность – 0,101 Вт/(м·°С).

Разработанный состав керамзитопенобетона был использован для изготовления опытной партии стеновых панелей в КУПП «Ганцевичский комбинат панельного домостроения», которые в настоящее время проходят физико-механические и теплофизические испытания в ГП ««Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С. С.»».

ЛИТЕРАТУРА

1. Комиссаренко Б.С. Керамзитопенобетон – эффективный материал для наружных ограждающих конструкций // Известия ВУЗов. Строительство. – 2000. – № 1. – С. 2–7.
2. Мордич М.М. Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства // Наука и техника. – 2019, Т. 18 (4). – С. 292–302.
3. Лукаш Е.В., Кузьменков М.И. Получение керамзитопенобетона с повышенными теплоизоляционными свойствами // Сб. докладов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Губкин, 9 апреля 2020 г. – Т1. – С 256–259.

В.Г. Зарапин, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
Н.П. Матвейко, проф., д-р хим. наук (БГЭУ, г. Минск)

ФИБРА С МИКРОРЕЛЬЕФНОЙ ТЕКСТУРОЙ ДЛЯ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ

Дисперсно армированные фиброматериалы, в частности сталефибробетон, применяют в различных областях, и, не смотря на широкое распространение стальных фибр, сложности максимального использования их возможностей продолжают сохраняться, и одной из основных является проблема анкеровки фибр. Опубликовано значительное количество патентных разработок, направленных на улучшение анкеровки фибр, например, фибры с выступами и впадинами в форме трехмерной волны [1], в форме тора с выпусками-анкерами в виде усов [2], в форме объемного винтообразного криволинейного отрезка проволоки [3], в виде нити с анкерами на концах, состоящей из двух ветвей с общим анкером [4], в форме равностороннего треугольника [5] и др. Для улучшения анкеровки предлагается усложнение строения фибр, что усложняет технологию производства, требует наличия специального оборудования, увеличивает расход стали. Такие фибры вследствие развитости формы склонны к комкованию с образованием «ежей», что препятствует их равномерному распределению в строительных смесях.

Задачей данных исследований является улучшение анкеровки стальных фибр в цементных строительных материалах путем формирования на поверхности фибр микрорельефной структуры, позволяющей получить анкеровку фибр по всей поверхности.

Исследования проводили с использованием фибр стальных анкерных ФСН-А-1,00/50 ОАО «БМЗ» (нить длиной 50 мм и диаметром 1 мм с анкерными отгибами на концах), а также с использованием прямой фибры из стальной проволоки диаметром 1 мм.

Разработан состав травильного раствора, позволяющий в течение 10-15 минут получать на поверхности стальных фибр микрорельефную текстуру, состоящую из хаотично расположенных, немного вытянутых вдоль оси проволоки «кратеров» в количестве 35-40 мм⁻¹, с поперечными размерами 100-180 мкм, продольными – 350-500 мкм, глубиной до 100 мкм.

Качество анкеровки фибр оценивали по испытаниям на статическое выдергивание из цементного раствора (песок и цемент (ПЦ-500) в соотношении 3:1, В/Ц = 0,5) в форме призм 40×40×30 мм в которые анкеровали концы фибр на 20 мм. Оценку влияния микрорельефной тек-

стуры поверхности фибр на механические свойства цементно-песчаных растворов, проводили по испытаниям на сжатие (кубы с ребром 100 мм) и на растяжение при изгибе (балочки 40×40×160 мм), которые армировали фиброй в количестве 80 г/дм³ раствора. Испытания на статическое выдергивание фибр проводили со скоростью 0,1 мм/мин на испытательной машине KASON WDW-100, испытания на сжатие проводили на автоматическом прессе MATEST C071N со скоростью нагружения 0,6±0,1 МПа/с. Испытания на растяжение при изгибе балочек проводили на машине KASON WDW-100 со скоростью нарастания испытательной нагрузки 0,05±0,01 кН/с.

Результаты испытаний на статическое выдергивание фибр – средние значения наибольшей нагрузки, предшествующей осевому смещению фибры (F_{max}) и удельной силы сцепления фибры с раствором (F_y), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний на статическое выдергивание

№ п/п	Вид анкеруемой фибры	F_{max} , Н	F_y , Н/мм
1	Гладкая прямая фибра	187	9,35
2	Гладкая фибра с анкерным отгибом на конце	285	14,25
3	С анкерным отгибом и микрорельефной текстурой	598	29,90
4	Прямая фибра с микрорельефной текстурой	575	28,75

Установлено, что микрорельефная текстура на поверхности фибр увеличивает силу F_y в 3,1 раза для прямой фибры и в 2,1 раза для фибры с анкерным профилем. Важно отметить, что прямая фибра с микрорельефной текстурой показала характеристики на 3,8 % ниже, чем текстурированная фибра с анкерным отгибом, что свидетельствует об основном вкладе в анкерровку такой фибры сцепления цементного камня с ее поверхностью.

Средние значения пределов прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$) и на растяжение при изгибе (σ_p) образцов цементных растворов, приведены в таблице 2. Армирование фибрами из гладкой проволоки с анкерными отгибами на концах позволяет увеличить предел прочности на сжатие на 30 % по сравнению с неармированным раствором, а наличие у фибр микрорельефной текстуры на поверхности увеличивает предел прочности при сжатии на 22 % по сравнению с гладкой анкерной фиброй и в 1,9 раз по сравнению с неармированным раствором.

Таблица 2 - Результаты испытаний на сжатие и растяжение при изгибе

№ п/п	Вид фибры, использованной для армирования	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа
1	Без фибры	16,99	5,16
2	Гладкая фибра с анкерными отгибами на концах	24,58	6,84
3	С анкерными отгибами и микрорельефной текстурой	31,54	11,80
4	Прямая фибра с микрорельефной текстурой	29,86	10,45

Использование прямой фибры с микрорельефной текстурой позволяет получить предел прочности при сжатии на 5,3 % ниже, чем использование текстурированной фибры анкерного профиля, что подтверждает существенность вклада поверхностной анкеровки по сравнению с наличием анкерных отгибов. Наличие у фибр микрорельефной текстуры на поверхности позволяет увеличить предел прочности на растяжение при изгибе на 73 % по сравнению с гладкой анкерной фиброй и почти в 2,3 раза по сравнению с неармированным бетоном, и практически такие же результаты (на 11 % ниже) достигаются при использовании прямой фибры с микрорельефной текстурой.

Полученные результаты показали, что вклад поверхностной анкеровки текстурированной фибры становится основным, а наличие анкерных отгибов на концах фибр перестает играть существенную роль, следовательно, для армирования целесообразно использовать прямую фибру с микрорельефной текстурой, поскольку такой вид фибр проще в производстве и характеризуется лучшей равномерностью распределения в объеме строительной смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1 RU № 2433227, МПК Е 04 С 5/00. Арматурный элемент для дисперсного армирования бетона. Шеметов, Г.В. и др. 10.11.2011.

2 RU № 2490406, МПК Е 04 С 5/03. Арматурный элемент для дисперсного армирования бетона. Трофимов В.И. и др. 20.08.2013.

3 RU № 113199 U1. МПК В 32 В 5/16. Волокно для армирования. Гатитулин М.Н. 10.02.2012.

4 RU № 2601705 С1. МПК Е 04 С 5/00, С04В 14/38. Фибра для дисперсного армирования бетона. Трофимов В.И. и др. 10.11.2016.

5 RU № 2667256 С2. СПК Е 04 С 5/12. Арматурный элемент. Харлов С.Н. 10.11.2017.

И. М. Терещенко, доц., канд. техн. наук;
Ю. Г. Павлюкевич, доц., канд. техн. наук;
И. В. Войтов, проф., д-р техн. наук;
С. В. Шетько, доц., канд. техн. наук;
А.В. Войтова, инж. (БГТУ, г. Минск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТСЕВОВ ГРАНИТОИДНЫХ ПОРОД МИКАШЕВИЧСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВОЛОКНА

Использование изверженных горных пород, не требующих введение дополнительных компонентов с целью корректировки свойств получаемых волокон и характера плавления породы, считается перспективным, поскольку не требует значительных энерго- и трудозатрат, связанных с подготовкой шихты и, к тому же, обеспечивает придание волокну ряда ценных свойств, расширяющих сферу его использования.

В этом плане, безусловно, заслуживает отдельное внимание использование базальтовых горных пород в качестве однокомпонентного сырья в производстве непрерывного волокна. Эти породы (базальты, диабазы, амфиболиты, порфириды и др.) достаточно широко распространены на территории Украины и стран СНГ, дополнительным их преимуществом является тот факт, что плавка происходит без стадии силикатообразования, а, значит, практически без эмиссии газов и других видов выбросов.

По сравнению со шлаками, ранее служившими основным сырьем для получения минеральных волокон, базальты обеспечивают более высокий выход годного продукта, имеют повышенный модуль кислотности ($M_k = (SiO_2 + Al_2O_3) / (CaO + MgO)$), что положительно влияет на химическую и термическую стойкость волокна.

Базальтовое волокно является негорючим и огнестойким, при пожаре выдерживает прямое воздействие пламени и температуры до 1000 °С, не выделяет дыма и токсичных газов. Гигроскопичность базальтовых волокон в 6 раз ниже, чем у стеклянных волокон. Базальтовые волокна – диэлектрики, прозрачные для и радио- и электромагнитного излучений, являются основой для производства электроизоляционных материалов, включая обтекателей антенн.

В то же время, базальты и им подобные породы являются достаточно сложными объектами с точки зрения технологии получения волокнистых материалов на их основе вследствие непостоянства химиче-

ского состава, высокой температуры плавления, неизбежности гомогенизации полученного расплава, содержания тугоплавких включений и склонности к кристаллизации расплавов.

В Республике Беларусь отсутствуют разрабатываемые месторождения базальтов, однако, имеются месторождения гранодиоритовых пород Микашевичского месторождения, содержащие до 16 % свободного кварца, широко используются в дорожном строительстве в виде щебня, для чего подвергаются многостадийному измельчению и просеву. При этом значительная доля сырья (до 30 %) образуют так называемые отсевы (фракция <5 мм), которые, будучи сугубо местным материалом, используются слабо и загрязняют окружающую среду. В связи с этим использование отсевов целесообразно только в случае получения на их основе продукта с высокой прибавочной стоимостью, каковым и является минеральное волокно.

Предпринятое изучение возможности использования гранитоидных отсевов в производстве непрерывного волокна показало следующее:

– минералогический состав исходной породы представлен следующими минералами: диориты до 80 % от общего объема породы, включающие плагиоклаз (65–70 %), роговая обманка – до 10 %, биотит – до 5 %, кварц – до 15 %, калиевый полевой шпат – до 8 %; гранодиориты – около 8 % от общего объема породы, представленные преимущественно плагиоклазом – до 80 %, калиевым полевым шпатом и кварцем; гранит – до 12 % от общего объема породы, представлен кислым плагиоклазом – до 60 %, свободным кварцем – около 30 %, калиевым полевым шпатом – 10 %, кроме того в породе содержится около 8–10 % оксидов железа в дисперсном состоянии. Таким образом, рассматриваемая горная порода практически не содержит пироксенов – минералов цепочечной структуры, обязательной составной части базальтов;

– химический состав обогащенной исходной породы показывает, что она практически представляет собой полевошпатовое сырье, загрязненное оксидами железами со следующим химическим составом (мас.%): SiO_2 52.48±1.09; Al_2O_3 14.48±0.57; $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 9.82±0.76; CaO 7.23±0.27; MgO 5.20±0.31; K_2O 3.34±0.27; Na_2O 2.91 ±0.13; TiO_2 1.43±0.05; SO_3 0.46±0.16; P_2O_5 0.84±0.12; ППП 1.71±0.28; свободный кварц <1.2. Приведенные выше данные по девяти пробам породы свидетельствуют о высокой степени ее однородности по химическому составу. Кроме того, в сравнении с базальтами, имеет место повышенное содержание кремнезёма, ограниченное содержание щелочноземельных компонентов и увеличенное содержание щелочей. Следует от-

метить низкий уровень потерь массы при прокаливании, что определяет слабое газообразование при плавке породы, а также практически полное отсутствие свободного кремнезёма, что способствует наряду с дисперсностью породы ее быстрому плавлению;

– расчетные значения модулей кислотности и вязкости, часто применяемых при оценке пригодности горных пород к производству, приведены ниже: полученные значения $M_k = 5,25-5,38$ и $M_v = 3,3-3,5$ характерны для средних силикатных пород, образующих расплавы повышенной вязкости;

– отсутствие тугоплавких соединений в исследуемом материале позволяет достичь его полного плавления при 1420–1430 °С и достижения полной однородности расплавом при 1450 °С и выдержке 30 мин;

– для расплавов, полученных на основе исследуемой породы определены значения краевого угла смачивания θ платиновых сплавов, который при 1350 составляет 24–25 °, что существенно ниже, чем у базальтов ($\theta=5-8$ °) и полностью исключает явление затекания фильерного поля при вытяжке волокон, характерное для базальтов, нарушая процесс волокнообразования.

– склонность к кристаллизации получаемых расплавов – одна из ключевых проблем базальтовых технологий. Изученный нами механизм кристаллизации базальтовых стекол заключается в следующем: в области температуры 1230–1270 °С (при охлаждении либо выдержке) из расплава выделяются мелкие кристаллы гематита либо магнетита (зависит от соотношения Fe_2O_3/FeO в расплаве), которые являются центрами (зародышами), на которых растут кристаллы пироксенов (авгит), что приводит к объемной кристаллизации стекла и, как следствие, нарушению процесса волокнообразования. Таким образом, температура верхнего предела кристаллизации $T_{впк}$ ограничивает снизу температурный интервал волокнообразования, который для базальтов не превышает 40–50 °С. В исследуемой же породе отсутствуют минералы с цепочечной структурой, способные в расплаве сохранять «память» о своем прошлом и выкристаллизовываться из него при удобном случае. В итоге гранитоидные расплавы не подвергаются объемной кристаллизации при охлаждении в широком интервале температур (1400–1000 °С), что подтверждается термограммами, полученными методом ДСК в режимах нагрева и охлаждения стекла, полученного на основе исследуемой породы (рис. 1).

Как следует из рисунка, при охлаждении расплава от 1400 °С со скоростью 10 °/мин не наблюдаются фазовые изменения вплоть до 815 °С. Экзотермический эффект при этой температуре связан с выделением кристаллов магнетита.

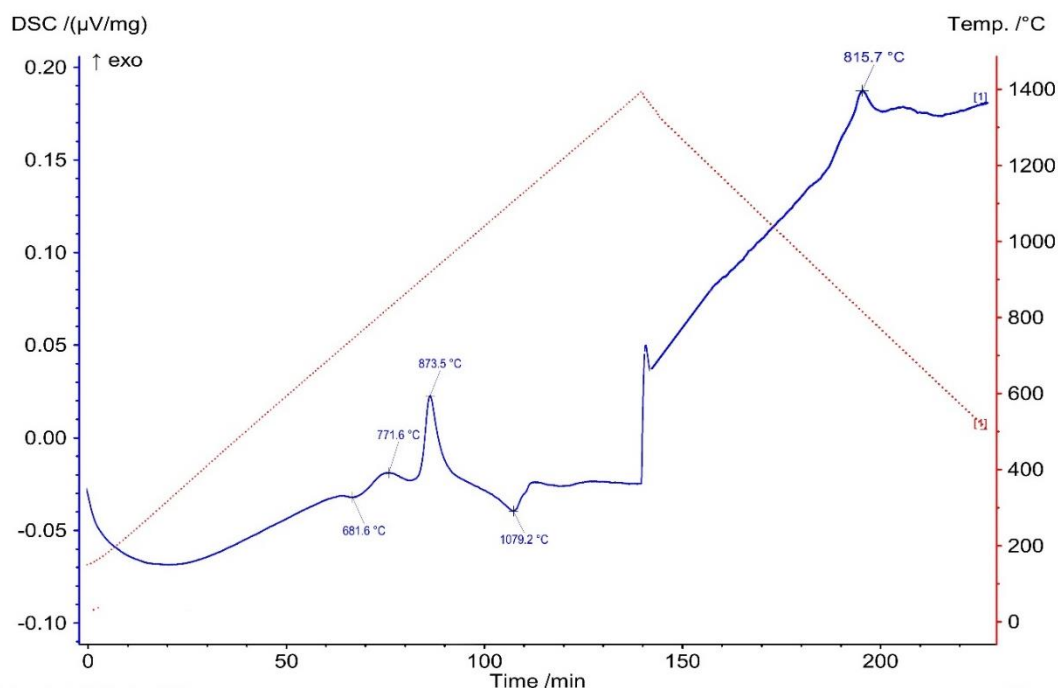


Рисунок 1 – ДСК исходного стекла (проба №3)

Изучение вязкости опытных расплавов показывает, что значения вязкости 10–30 Па·с, при которых осуществляется вытяжка непрерывного волокна находятся в интервале температур 1320–1450 °С, что соответствует температурам волокнообразования.

Таким образом, обогащенная гранитоидная порода Микашевичского месторождения по всем параметрам пригодна для использования без подшихтовки в качестве сырья для получения тонкого непрерывного волокна и изделий из него.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. – М.: Теполэнергетик, 2002. – 412 с.
2. Татаринцева О.С. Изоляционные материалы из базальтовых волокон, полученных индукционным способом. Автореферат на соискание степени доктора технических наук. – Томск, 2006. – 42 с.
3. ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ (ХД 20-402) «Исследование минерального сырья, предоставленного Обществом с ограниченной ответственностью «Завод минваты ИЗОПЛИТ», с целью определения возможности получения штапельного и непрерывного волокна».

М. В. Дяденко, доц., канд. техн. наук;
И. А. Левицкий, проф., д-р техн. наук;
Н. М. Петух, студ. (БГТУ, г. Минск)

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ СТЕКОЛ ДЛЯ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ЖЕСТКОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В Республике Беларусь производство изделий волоконной оптики осуществляется на ОАО «Завод «Оптик» (г. Лида).

Актуальной проблемой предприятия является повышение контраста и чистоты поля зрения изготавливаемых волоконно-оптических элементов. Диффузия d-элементов на границах раздела «световедущая жила–светоотражающая оболочка–защитная оболочка» снижает чистоту поля зрения волоконно-оптических изделий, поэтому выявление факторов, влияющих на скорость диффузии в процессе формирования жесткого оптического волокна и волоконно-оптических элементов является важной задачей.

Поскольку пропускная способность жесткого оптического волокна определяется соотношением показателей преломления стекол световедущей жилы и светоотражающей оболочки, то составы таких стекол достаточно стабильны и, как правило, не подвергаются корректировке при изготовлении различных партий волоконно-оптических изделий. Стекло для защитной оболочки выполняет в определенной мере вспомогательную функцию, его оптические постоянные не нормируются, поэтому в процессе изготовления волоконно-оптических элементов различного назначения состав данного стекла подвергается корректировке с целью регулирования их поглощающей способности и реологических характеристик.

В связи с этим в настоящей работе проводились исследования, направленные на оптимизацию составов стекол для защитной оболочки.

Стекло для защитной оболочки должно отвечать следующим требованиям:

- обладать устойчивостью к кристаллизации при длительных изотермических выдержках;
- иметь температурный коэффициент линейного расширения $(73-78) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ для обеспечения термомеханической прочности оптического волокна;
- характеризоваться высокой поглощающей способностью в видимом диапазоне спектра;
- быть согласованным по реологическим свойствам со стеклами световедущей жилы и светоотражающей оболочки, определяющим

геометрические размеры оптического волокна и качество получаемых волоконно-оптических изделий.

В связи с этим для согласования стекол световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек при изготовлении волоконно-оптических изделий различного назначения требуется оптимизация соотношения модификаторов и стеклообразователей, а также количества красителей в составе опытных стекол защитной оболочки.

Для исследования выбрана система $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ с постоянными добавками K_2O , CaO , MgO и BaO . Совместное введение оксидов натрия и калия позволяет подавить фазовое разделение и обеспечить получение некристаллизующихся в процессе длительной термообработки стекол. Введение в состав стекол BaO , CaO и Al_2O_3 позволяет регулировать реологические и термические свойства стекол. Кроме того, в составе опытных стекол сверх 100 % присутствуют красящие оксиды Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , CoO в суммарном количестве 1,25 мол. %.

По результатам исследований установлено, что максимальные показатели плотности достигается при содержании Na_2O , составляющем 13,0 мол. %, что обусловлено повышением плотности упаковки структурных элементов при введении оксидов типа R_2O . Использование стекол с более высокими показателями плотности позволяет снизить степень диффузии красящих ионов из стекла защитной оболочки в светоотражающую оболочку и световедущую жилу в процессе получения одножильных и многожильных световодов. В связи с этим оптимальной является область составов стекол с постоянным содержанием Al_2O_3 , составляющим 1,0 мол. %, и 10,5–13 мол. % Na_2O .

Одной из основных характеристик получения жесткого оптического волокна является его термомеханическая прочность, которая определяется соотношением значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) стекол световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек.

По результатам определения ТКЛР дилатометрическим методом выявлено, что оптимальной с точки зрения получения стекол для защитной оболочки оптического волокна является область составов стекол с постоянным содержанием Na_2O , составляющим 8,0 мол. %. Теплоемкость отражает способность материалов поглощать тепло с ростом температуры и определяет их тепловую инерцию. Для стекол волоконной оптики величина теплоемкости характеризует скорость выравнивания температуры по сечению оптического волокна и, как следствие, определяет его термомеханическую прочность.

Установлено, что требуемые показатели теплоемкости, достигаются при содержании в составе опытных стекол 3,5 мол. % Al_2O_3 и суммарном количестве ($\text{SiO}_2+\text{B}_2\text{O}_3$), составляющем 78–83 %.

Проведено изучение влияния количества и соотношения красителей (CoO , Mn_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3) в составе стекла защитной оболочки на его светопропускание и цветовые характеристики.

Определено, что использование комбинации красителей $\text{Mn}_2\text{O}_3:\text{Cr}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3$ в соотношении 2:2:2 позволяет получить стекло для защитной оболочки с длиной доминирующей волны и чистотой тона, близкими к стеклу промышленного состава.

Для обеспечения стабильности процесса вытягивания одножильных и многожильных оптических волокон, а также качества получаемых на их основе волоконно-оптических изделий необходимо, чтобы стекла световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек были согласованы по вязкостным характеристикам между собой в интервале значений 10^9 – 10^4 Па·с.

По результатам исследований установлено, что значениям вязкости 10^9 – 10^6 Па·с для стекла защитной оболочки разработанного состава (в отличие от стекла промышленного состава марки ВТО-73) характерны более низкие температуры, а для значений 10^6 – 10^4 Па·с – более высокие.

Использование стекла защитной оболочки разработанного состава в сравнении с промышленным стеклом защитной оболочки при получении волоконно-оптических изделий более предпочтительно в силу следующих причин:

- получение многожильных световодов (МЖС) и прессование пакета МЖС будет осуществляться при температурах на 10–15 °С ниже промышленных, что позволит снизить степень диффузии красящих оксидов из стекла защитной оболочки в светоотражающую и световедущую жилу;

- вытягивание одножильных световодов не потребует корректирования технологических параметров, так как в области высоких температур стекла промышленного и разработанного составов характеризуются практически одинаковыми показателями вязкости.

Таким образом, на основании проведенных исследований теплофизических, оптических и реологических характеристик разработан состав стекла для защитной оболочки, которое может быть рекомендовано для использования в производстве жесткого оптического волокна на ОАО «Завод «Оптик» (г. Лида).

М. В. Дяденко, доц., канд. техн. наук;
И. А. Левицкий, проф., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск);
Д. С. Быченко, доц., канд. физ.-мат. наук (НИИ ЯП БГУ, г. Минск);
А. Г. Сидоревич, магистрант (БГТУ, г. Минск)

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКСИДОВ TiO_2 , ZrO_2 , La_2O_3 НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЩЕЛОЧНЫХ БОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Воздействие электромагнитного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона на человека оказывает пагубное влияние, выражающееся в функциональном изменении деятельности нервной, эндокринной систем, появлении свободных радикалов, повышении вязкости крови, ухудшении памяти, развитии онкологических заболеваний.

Основными механизмами защиты от СВЧ-излучения является отражение, поглощение и многократное его отражение.

Изучение электрофизических характеристик имеет важное значение при разработке радиозащитных материалов, которые находят широкое применение в качестве защиты от воздействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного СВЧ-диапазона.

Характер взаимодействия радиоволн со стеклом определяется его электрическими свойствами. При помещении образца стекла в электромагнитное поле в нем может возникнуть ток сквозной проводимости, вызванный движением свободных зарядов и определяемый структурой стекла, а также поляризация, механизм которой связан со смещением центров электрических зарядов частиц, поворотом осей дипольных молекул или миграцией носителей зарядов.

Природа диэлектрических потерь неорганических материалов, в частности стекла, при СВЧ-воздействии на протяжении значительного времени всесторонне не исследовалась, и в литературе приводятся лишь данные для отдельных типов стекол.

В предыдущих работах нами проведено изучение тепло- и электрофизических характеристик щелочных боросиликатных стекол во взаимосвязи с их структурой [1, 2].

Целью данной работы является изучение зависимости электромагнитных свойств щелочных боросиликатных стекол в диапазоне 12–18 ГГц от количества оксидов циркония, титана и лантана, вводимых индивидуально взамен Na_2O в количестве от 2,5 до 7,5 мол. %. Исследование высокочастотных электромагнитных свойств боросиликатных стекол необходимо для их практического применения при изготовлении термо- и радиационностойких элементов СВЧ-систем.

Синтез опытных стекол осуществлялся в фарфоровых тиглях в газовой печи периодического действия при температуре 1480 ± 20 °С.

Электромагнитные свойства исследуемых образцов стекол исследованы в диапазоне 12–18 ГГц с помощью векторного анализатора Микран Р4М («Микран», Томск, Россия). Порты векторного анализатора регистрировали относительную амплитуду и фазу отраженного и прошедшего через образец излучения.

По результатам измерения электромагнитного отклика образцов стекол толщиной порядка 0,9 мм установлено наличие существенной отражающей способности у образцов указанной толщины (значения спектральных коэффициентов отражения и пропускания СВЧ-излучения составили 35–50 % и 50–60 %, соответственно).

Коэффициент поглощения во всем диапазоне измерений не превышал 5 % для всех исследуемых образцов стекол. Максимальная величина коэффициента отражения, составляющая порядка 50 %, характерна для стекла, включающего 5,0 мол. % ZrO_2 , при общем коэффициенте пропускания электромагнитного излучения СВЧ-диапазона 45 %.

Введение оксида титана в составы щелочных боросиликатных стекол в количестве 2,5–7,5 мол. % способствует значительному снижению величины пропускания электромагнитного излучения (на 12 % по сравнению с наиболее прозрачными образцами). Данный факт вероятно связан с формированием в структуре стекла группировок, обладающих повышенной поляризуемостью, что обуславливает общий рост эффективной диэлектрической проницаемости материала и приводит к росту коэффициента отражения, а также способствует уменьшению прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

Одной из основных электрофизических характеристик, присущих непосредственно материалу, а не образцу, является комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$. Ее действительная часть ε' обуславливает электрическую емкость материала, в то время, как мнимая часть ε'' ответственна за диссипацию энергии в материале, из-за чего в литературе упоминается в виде фактора потерь (loss factor) [3, 4].

Диэлектрическая проницаемость исследованных стекол в рассматриваемом диапазоне практически монотонна (не обладает выраженной дисперсией), что позволяет рассмотреть ее концентрационную зависимость на фиксированной частоте 15 ГГц. Действительная часть диэлектрической проницаемости находится в диапазоне 5,5–7,0 и обладает существенной зависимостью от концентрации вводимого оксида (La_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2). Примечательно, что если в состав стекол входит La_2O_3 , зависимость носит монотонно-возрастающий характер, а для стекол остальных составов (включающих ZrO_2 , TiO_2), на представленной зависимости,

по-видимому, наблюдается насыщение. Подтверждение такого поведения требует дальнейшего исследования стекол с более широким диапазоном концентраций вводимого оксида, а также свойств щелочного боросиликатного стекла, не содержащего указанные оксиды. Установлено, что изменение доли вводимых оксидов практически не оказывает влияния на мнимую часть диэлектрической проницаемости, а ее величина не превышает 0,15.

Таким образом, все исследованные стекла характеризуются существенно диэлектрическим поведением и малой диссипацией энергии в СВЧ-диапазоне. Данные свойства позволяют рассматривать боросиликатные стекла в качестве материала для элементов СВЧ-соединений. Совокупность электромагнитных и механических характеристик стекол показывает возможность их использования в качестве термостойких прозрачных окон для вывода СВЧ-излучения в свободное пространство. Существенное отражение излучения от поверхности стекол объясняется отличием их диэлектрической проницаемости (а, следовательно, и коэффициента преломления) от таковых для свободного пространства и может быть устранено путем вариации толщины или формы стеклянных элементов СВЧ-устройств [5]. Возможное насыщение электромагнитных свойств, предположительно наблюдаемое для стекол, содержащих ZrO_2 и TiO_2 , требует дополнительного изучения ввиду возможности дальнейшего увеличения концентрации данных оксидов при сохранении комплекса электромагнитных свойств исследуемых стекол.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дяденко М.В. Стекла радиозащитного назначения // Стекло и керамика. – 2019. – №7. – С. 8–14.
2. Дяденко М.В., Маскевич В.В., Гундилович Н.Н. Стекла, ослабляющие электромагнитное излучение СВЧ-диапазона // Механика и технологии. – 2018. – №1. – С. 103–111.
3. Microwave electronics: measurement and materials characterization / ed. Chen L. Chichester: John Wiley, 2004. – 537 p.
4. THz Spectroscopy as a Versatile Tool for Filler Distribution Diagnostics in Polymer Nanocomposites / Gorokhov G. [et al] // Polymers. – 2020. – Vol. 12, № 12. – P. 3037.
5. Exploring carbon nanotubes /BATiO₃/ Fe₃O₄ nanocomposites as microwave absorbers / Bychanok D. [et al] // Progress In Electromagnetics Research C. – 2016. – Vol. 66. – P. 77–85.

И. А. Левицкий, проф., д-р. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
И. И. Жукова, магистр техн. наук; М. В. Комар
(ОАО «Керамин», г. Минск)

АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КЛИНКЕРНОГО КИРПИЧА В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

В результате лабораторно-экспериментальных исследований установлена возможность синтеза керамических масс для получения клинкерного кирпича пластическим методом подготовки сырья на основе поликомпонентной системы минерального сырья Республики Беларусь, включающей, мас. %: тугоплавкую глину месторождения «Городное» в количестве 5–20; суглинок месторождения «Фаниполь» – 35–55; гранитоидные отсева фракций менее 0,1 мм – 20 – 40; глину легкоплавкую месторождения «Большая Карповка» марки БК-0 (Россия) – 10. Установлена оптимальная область составов, включающая выше перечисленные сырьевые материалы в интервалах мас. %: 5–10; 40–50; 35–40 и 10, соответственно. Установлены технически обоснованные параметры термообработки: максимальная температура обжига изделий составляет $(1150 \pm 5)^\circ\text{C}$ с выдержкой при данной температуре – 3 ч.

Образцы клинкерного кирпича оптимальной области составов характеризуются следующими физико-химическими и технологическими свойствами: общая усадка составляет 6,7–8,0 %; водопоглощение – от 3,4 до 7,2 %; плотность – $(2,15\text{--}2,48) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Механическая прочность при сжатии и изгибе – соответственно 9,0–17,1 и 72,01–136,3 МПа. Морозостойкость образцов при объемном замораживании составляет 175 циклов, истираемость – 0,20–0,40 г/см².

Основными кристаллическими фазами образцов клинкерного кирпича является муллит, α -кварц, анортит и гематит.

Анализ зависимости физико-химических свойств изделий от химического состава исследуемых масс позволил установить, что область оптимальных составов отвечает следующему пределу содержания оксидов, мас. %: SiO_2 – 63,1–67,8; Al_2O_3 – 15,2–17,8; сумма оксидов щелочных ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) и щелочноземельных ($\text{CaO} + \text{MgO}$) металлов – 5,5–6,5; сумма $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ – 5,2–7,1.

Установлено, что для оптимальной области составов соотношение оксидов $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ должно составлять 6,0–6,4.

Промышленная апробация технологии получения клинкерного кирпича проводилась в условиях Минского керамического завода

ОАО «Керамин» с использованием действующего технологического оборудования и теплотехнических установок с необходимой корректировкой технологических параметров.

Сопоставленный анализ химического состава применяемого в исследованиях сырья для лабораторного синтеза и проведения промышленных испытаний показал различие содержания составляющих оксидов. Это потребовало корректировки рецептуры сырьевой смеси для получения клинкерного кирпича по химическому и минеральному составу, согласно установленному нами в процессе выполнения исследований соотношения.

Обжиг образцов клинкерного кирпича производился в промышленной туннельной печи FMO–470. Продолжительность тепловой обработки кирпича составляла 2,5 ч при максимальной температуре обжига 1120 ± 10 °С. Общая продолжительность режима термообработки, включая охлаждение, составила 20 ч.

Визуальным контролем обожженных образцов клинкерного кирпича установлено отсутствие дефектов поверхности изделий, цвет их был равномерный шоколадно-коричневого цвета.

Полученные образцы изделий подвергались контролю физико-химических свойств в соответствии с требованиями СТБ 1787 – 2007.

Водопоглощение опытных изделий составило 4,56 %, относительная плотность – 2190 кг/м³, усадка общая – 7,5 %; удельная эффективность радионуклидов – 178 Бк/кг. Механическая прочность при сжатии составила 42,5 МПа, при изгибе – 5,1 МПа; морозостойкость – 100 циклов.

Таким образом, клинкерный кирпич, обожженный при указанных режимах, соответствовал классу Б.

Рентгенофазовым анализом в изделиях установлено наличие кристаллических фаз муллита, анортита, кварца и гематита

По сравнению с лабораторными образцами выросло количество кристаллической фазы анортита в связи с более длительной выдержкой изделий в туннельной промышленной печи. Возросло также относительное количество кристаллической фазы муллита, который также формируется из расплава. Рост продолжительности выдержки при максимальной температуре обжига обусловил рост его содержания примерно вдвое.

Что касается фаз гематита, то относительное количество при повышении продолжительности выдержки при максимальной температуре несколько снижается. Это, очевидно, обусловлено растворением мелкокристаллических образований гематита в формирующемся при более длительном процессе обжига расплаве.

Следует отметить, что интенсивность кристаллической фазы реликтовых зерен низкотемпературного кварца в образце, полученного при заводских испытаниях, несколько снижено по сравнению с лабораторным образцом, что также обусловлено его плавлением при более длительной термической обработке.

Электронно-микроскопическим исследованием методом сканирования скола образцов установлено, что их микроструктура включает преимущественно кристаллическую фазу, аморфизированное вещество, а также стекловидную и газовую фазу.

Микроструктура изделий, полученных в заводских условиях, по сравнению с лабораторными образцами, представлена более крупными кристаллическими образованиями и увеличенной долей стекловидной фазы. Это, очевидно, обусловлено более продолжительным режимом обжига в заводских условиях. Что касается исследований кристаллических образований в локальных точках образцов заводских испытаний, то они характеризуются формированием таких же кристаллических образований и сохранением реликтовых кристаллов.

Проведенные исследования позволяют заключить, что формирующаяся в процессе обжига жидкая фаза, обладающая значительной вязкостью, которая возрастает с повышением температуры, действует следующим образом. С точки зрения физической она за счет энергии поверхностного натяжения способствует сближению твердых частиц массы. Кроме того, обеспечивается и химическое взаимодействие за счет растворения минералов с последующим выделением из расплава термодинамически устойчивых кристаллов. Значительное количество расплава приводит также к взаимодействию продуктов термического разложения суглинков, глини и других составляющих компонентов сырьевой смеси. При этом формируются кристаллы преимущественно призматического или игольчатого, реже пластинчатого габитуса, которые при последующем охлаждении цементируются стеклофазой и выполняют армирующую роль, повышающую механическую прочность структуры материала.

Проведенная апробация составов масс в производственных условиях ОАО «Керамин» подтвердила возможность получения клинкерного кирпича по разработанным в исследованиях рецептуре и технологическим режимам.

И. А. Левицкий, проф., д-р. техн. наук;
М. В. Дяденко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФАЗОВОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БИОЦИДНЫХ ГЛАЗУРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Металлизированные глазури, обладающие антибактериальной активностью, являются полуфриттованными покрытиями, используемыми для декорирования керамогранита, обжигаемого в конвейерных роликовых пламенных печах при температуре 1200 ± 5 °С и продолжительности 50–60 мин.

Синтезированные в работе глазури обеспечивают формирование покрытий преимущественно черного, темно-серого и серовато-черного тонов, а с введением в их состав железосодержащих компонентов им сообщается красно-коричневая окраска. Основным красящим оксидом, обеспечивающим формирование цветовой гаммы, является CuO , вводимой в состав сырьевых композиций в количестве 8–15 мас. %. В зависимости от рецептурного состава формируются глазури с зеркально-блестящей, а также матовой фактурой поверхности. Блеск их соответственно составляет 100 % и 16–24 %.

Исследовано 7 серий металлизированных глазурных покрытий, обладающих биоцидными свойствами, показатели которых приведены в таблице.

Стандартные методики антибактериальной активности определяются отношением покрытий к тест-штаммам *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 и *Escherichia coli* ATCC 8739 в соответствии с методикой ИСО 22196:2011 «Измерение антибактериальной активности на поверхности пластмасс и других непористых материалов». Данные исследования проводились кафедрой микробиологии БГТУ и РУП «Научно-практический центр гигиены», аккредитованном в Национальной системе аккредитации Республики Беларусь. Как следует из таблицы, основными кристаллическими фазами, формируемыми при синтезе металлизированных глазурей, являются медьсодержащие образования тенорита (CuO) и иногда куприта (Cu_2O). При введении оксидов железа присутствует маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

Анализ шихтового состава синтезированных покрытий позволил установить, что фактура поверхности глазурей определяется содержанием в их шихтовом составе фритты и полевого шпата при суммарном их количестве 50 мас. % и более формируются зеркально-блестящие покрытия, а при содержании от 20 до 49 % – полуматовые и матовые покрытия. Формирование расплава указанными составляющими позволяет установить, что этот процесс не зависит от количественного содержания оксида меди (II). Это позволяет предполагать, что формирование кристаллических медьсодержащих фаз происходит из образующегося при обжиге расплава.

Таблица - Характеристика свойств металлизированных глазурей

Свойства	Номера составов и показатели свойств						
	2-7	3-14	4-8	5-3	6-4	7-12	8-8
Антибактериальная активность к тест-штаммам: Staphylococcus aureus ATCC 6538 Escherichia coli ATCC 8739	2,89 2,56	0,64 0,72	2,00 2,17	0,82 не исслед.	1,75 1,89	2,21 2,43	1,97 1,51
Содержание в шихте глазури: CuO полевого шпата фритты	15,0 27,5 22,5	11,5 25,5 23,0	10,0 27,5 27,5	8,0 – 20,0	15,0 20,0 25,0	10,0 22,5 27,5	15,0 25,5 25,0
Формирующиеся кристаллические фазы	Анортит, тенорит	Анортит, куприт, тенорит	Маггемит, тенорит	Анортит, куприт, тенорит	Анортит, маггемит, тенорит	Анортит, маггемит, тенорит	Анортит, куприт, андалузит, фаялит, тенорит, медь
Фактура поверхности глазури	Зеркально-блестящая	Матовая	Зеркально-блестящая	Матовая	Матовая	Зеркально-блестящая	Зеркально-блестящая
Цвет глазури	Черный	Темно-серый	Серовато-черный	Серовато-черный	Темно-серый	Красно-коричневый темный	Глубокий пурпурно-синий

Приведенными исследованиями дифференциально-сканирующей калориметрией на установке DSC 404 F3 Pegasus (Германия), установлено, что процессы формирования покрытий связаны с разложением карбоната магния, вводимого доломитом при 754–773 °С, что вызвано эндоэффектами значительной интенсивности. При 902–928 °С эндоэффект отвечает разложению карбоната кальция, присутствующего в доломите. Экзотермический эффект при 821–850 °С вызван формированием анортита. Повышение содержания CuO в исследованных составах приводят к закономерному снижению температуры плавления глазурных покрытий, что обусловлено способностью оксида меди образовывать легкоплавкие эвтектики с составляющими глазурной шихты. Наблюдаемый при 1020–1040 °С эндотермические эффекты могут быть связаны с диссоциацией тенорита по реакции $4\text{CuO} = 2\text{Cu}_2 + \text{O}_2$ с последующим окислением меди $4\text{Cu} + \text{O}_2 = 2\text{Cu}_2\text{O}$. Далее образующиеся оба оксиды меди подвергаются плавлению [1].

Установлено, что антибактериальная активность металлизированных глазурей зависит от количества тенорита и куприта, образующихся в глазурном поверхностном слое покрытия. Рост интенсивности кристаллических фаз тенорита и анортита придает покрытию матовую фактуру поверхности, и снижению биоцидных свойств. Так, значения антибактериальной активности покрытий составляют 0,64–1,75 единиц по отношению к штамму *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 и 0,72–1,89 – *Escherichia coli* ATCC 8739. Для блестящих глазурных покрытий значения антибактериальной активности существенно выше и составляют 1,97–2,89 и 1,51–2,56 единиц соответственно. Это, очевидно, обусловлено тем, что покрытия с зеркально-блестящей поверхностью с менее развитым процессом кристаллизации и преобладанием стекловидной составляющей, имеют диффузионную подвижность ионов Cu^{+2} выше, чем матовые покрытия, обладающие крупнокристаллической ситаллоподобной структурой.

Проведенные многочисленные исследования покрытий в условиях промышленного производства ОАО «Керамин» показали высокую бактерицидную активность разработанных составов. Применяемая в настоящее время на указанном предприятии технология получения биоцидных глазурей Microbat (СН(А)) [2] обеспечивает биологическую активность не превышающую значения 2,0.

ЛИТЕРАТУРА

1. Термический анализ минералов и горных пород / В.П. Иванова [и др.]. – Л: Недра. – 1974. – 399 с.
2. Керамическая плитка «Керамин» с антибактериальной защитой Microbat [электронный ресурс]. – URL: [http:// www.keramin.com/o-kompanii/](http://www.keramin.com/o-kompanii/).

ПОЛУЧЕНИЕ ФОСФАТА БОРА

Фосфат бора находит применение в химической промышленности как катализатор, как составная часть некоторых видов стекла и керамики (фарфора, высоковольтных изоляторов), а также как реактив в лабораторной практике. Фосфат бора отличается значительно меньшей по сравнению с составляющими компонентами (B_2O_3 и P_2O_5) летучестью до температур порядка $1450^\circ C$, что повышает возможности контроля состава синтезируемых борофосфорсодержащих стекол.

Методы, используемые для получения фосфата бора, разнообразны. Известны примеры синтеза фосфата бора с использованием в качестве исходных веществ органических производных бора и фосфора. Описаны способы получения фосфата бора, включающие выпаривание смеси реагентов с последующей кристаллизацией при высокотемпературной обработке, при воздействии микроволнового излучения и в гидротермальных условиях [1, 2].

Целью нашей работы было определение характеристик фосфата бора, синтезированного в гидротермальных условиях [1]. Исходную смесь реагентов во фторопластовом вкладыше со степенью заполнения 40-60 % помещали в стальной автоклав и выдерживали при заданной температуре в воздушном термостате.

После окончания опыта полученную суспензию фильтровали и промывали водой под вакуумом, сушили при $110-120^\circ C$ и определяли растворимость полученной твердой фазы в горячей воде. Условия и результаты проведения гидротермального синтеза представлены в таблице. Изучение взаимодействия смесей исходных реагентов с мольными отношениями от 1,0 до 2,0 в гидротермальных условиях в интервале температур $100-300^\circ C$ показало, что степень взаимодействия по борсодержащему реагенту возрастает с увеличением мольного отношения P_2O_5/B_2O_3 , температуры автоклавирования и суммарного содержания оксидов бора и фосфора в исходной смеси (таблица).

Пробы продукта, нерастворимого в горячей воде, анализировали на содержание P_2O_5 и B_2O_3 . Рентгенофазовый анализ указанной пробы проводился на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE Brucker AXS (Германия). Излучение – CuK_α . Идентификация кристаллических фаз проводилась с использованием международной картотеки Joint Comitee on Powder Diffraction Standart. ИК-спектры поглощения в области $4000\text{ см}^{-1} - 400\text{ см}^{-1}$ снимались на ИК-Фурье спектрометре NEXUS E.S.P. (США).

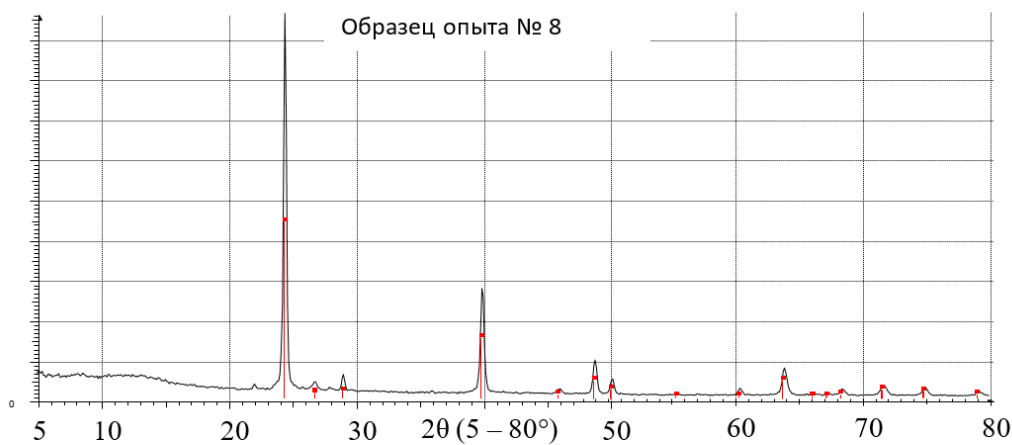
По результатам химического анализа нерастворимые в воде образцы содержат 66,03–67,0 % мас. P_2O_5 и 32,47–33,96 % мас. B_2O_3 . Величина мольного отношения P_2O_5 / B_2O_3 (0,97–1,002) близка к стехиометрической для фосфата бора. Пики дифрактограммы (рис.1) нерастворимого продукта соответствуют фосфату бора с тетрагональной кристаллической структурой (JCPDS карта № 34-132), причем последующее прокаливание при температурах в интервале 300–1000°C не изменяет абсолютной интенсивности и положения пиков на дифрактограммах. ИК-спектр фосфата бора (рис. 2) также хорошо соответствует данным для ИК-спектра ортофосфата бора. Потеря веса при снятии термограммы до 900°C составила 0,2 %.

Таблица – Условия и результаты синтеза в гидротермальных условиях

№ п/п	Исходные реагенты	R	Т-ра, °C	α , %	Растворимость горячей воде
1	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	1,0	100	56,8	растворим
2	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	1,0	150	64,9	растворим
3	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	1,0	200	69,5	растворим
4	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	1,0	250	72,3	растворим
5	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	1,5	100	87,5	растворим
6	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	1,5	150	88,5	растворим
7	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	1,5	200	100	растворим
8, 9	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	1,5	250 - 300	100	нерастворим
10	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	2,0	100	87,5	растворим
11	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	2,0	150	88,5	растворим
12-14	$H_3PO_4 + H_3BO_3$	2,0	200 - 300	100	нерастворим
15-18	$H_3PO_4 + B_2O_{3ст}$	1,5	150 - 300	100	нерастворим
19-22	$H_3PO_4 + B_2O_{3ст}$	2,0	150 - 300	100	нерастворим
23-26	$H_4P_2O_7 + H_3BO_3$	2,0	150 - 300	100	нерастворим

Примечание. R – мольное отношение реагентов в исходной смеси в пересчете на P_2O_5 / B_2O_3 . α – степень взаимодействия исходных реагентов по борсодержащему реагенту.

Таким образом, гидротермальный способ [1] позволяет исключить стадию прокалики и при относительно невысоких температурах получать перспективный технически важный материал – нерастворимый в воде кристаллический (тетрагональный) фосфат бора стехиометрического состава.



Дифрактограммы: образца фосфата бора;
 ■ - стандартного образца по карте 034-0132

**Рисунок 1 – Дифрактограмма нерастворимого
 в воде продукта**

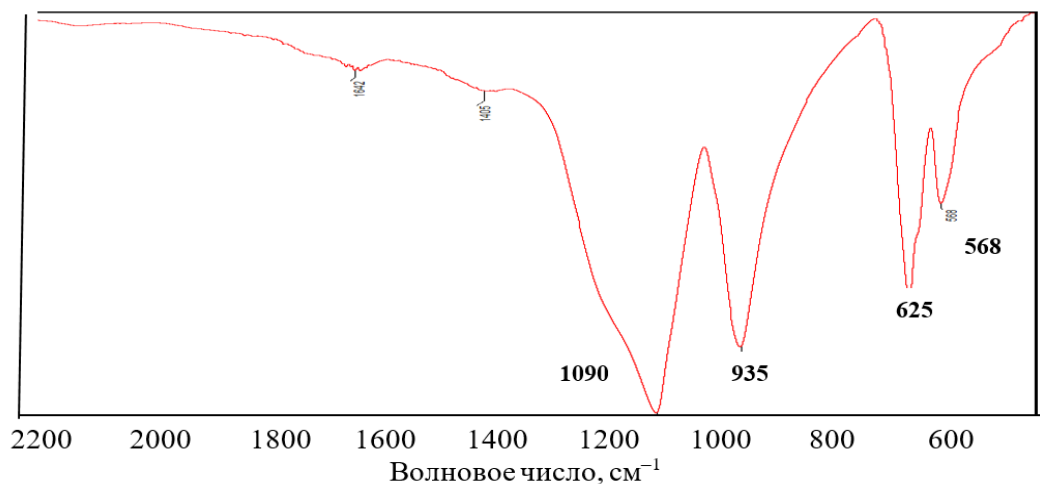


Рисунок 1 – ИК-спектр ортофосфата бора

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент SU 882924 А1. Способ получения фосфата бора. МПК С01В25/26 // В.В. Печковский, Г.Ф. Пинаев, Е.В. Габалов и др.; заявитель: Белорусский технологический институт; заявл. 17.03.1980; опубл. 03.11.1981 // Бюллетень изобретений и открытий. – № 43 (1981).

2. Baykal A. Hydrothermal and Microwave Synthesis of Boron Phosphate, BPO_4 / A. Baykal et al., //Turk. J. Chem.-25 (2001). – P. 425–432.

Ю.Г. Павлюкевич, доц., канд. техн. наук;
П.С. Ларионов, асп.; Л.Ф. Папко, доц., канд. техн. наук;
Е.Е. Трусова, доц., канд. техн. наук;
А.П. Кравчук, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

О ХИМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОПАНТОВ

Пропанты используются для интенсификации нефте- и газодобычи методом гидравлического разрыва пласта. В процессе эксплуатации пропанты подвергаются воздействию жидкостей гидроразрыва в качестве которых могут использоваться полимерсодержащие и безполимерные жидкости на водной и нефтяной основе, многофазные и вспененные жидкости, а также эмульсии и кислотные системы, в связи с чем к пропантам предъявляются требования по кислотостойкости [1].

Согласно ГОСТ Р 54571 химическая устойчивость пропантов оценивается по их растворимости в 15 %-ной HCl, которая должна составлять не более 1%, и в смеси кислот HCl и HF – не более 10 %.

Наибольшее влияние на химическую устойчивость стеклокристаллических материалов оказывают их температурно-временные режимы кристаллизации, структура, химический и фазовый составы.

Стеклокристаллические пропанты, синтезированные в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ в области составов, мас. %: R_2O – 6–15; CaO – 8–17; MgO – 2–11; Al_2O_3 – 12,61; Fe_2O_3 – 4,8; Cr_2O_3 – 0,9; SiO_2 – 56,3; TiO_2 – 0,41 характеризуются плотной мелкокристаллической структурой. Согласно данным рентгенофазового анализа в качестве основной кристаллической фазы присутствует пироксеновый твердый раствор типа авгита $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$. Кристаллизация авгита обусловлена изоморфизмом пироксенов, в которые могут встраиваться и взаимно замещаться Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Si^{4+} , Ti^{4+} , Na^+ и др. элементы. Указанные изоморфные замещения наряду с плотной тонкокристаллической структурой обуславливают высокую химическую устойчивость стеклокристаллических пропантов.

На рисунке приведено влияние химического состава и температуры обработки стеклокристаллических пропантов на их растворимость в смеси кислот HCl и HF при их концентрациях 12 и 3 мол. % соответственно. Химическую обработку проводили на водяной бане при температуре 66 °C в течение 30 мин.

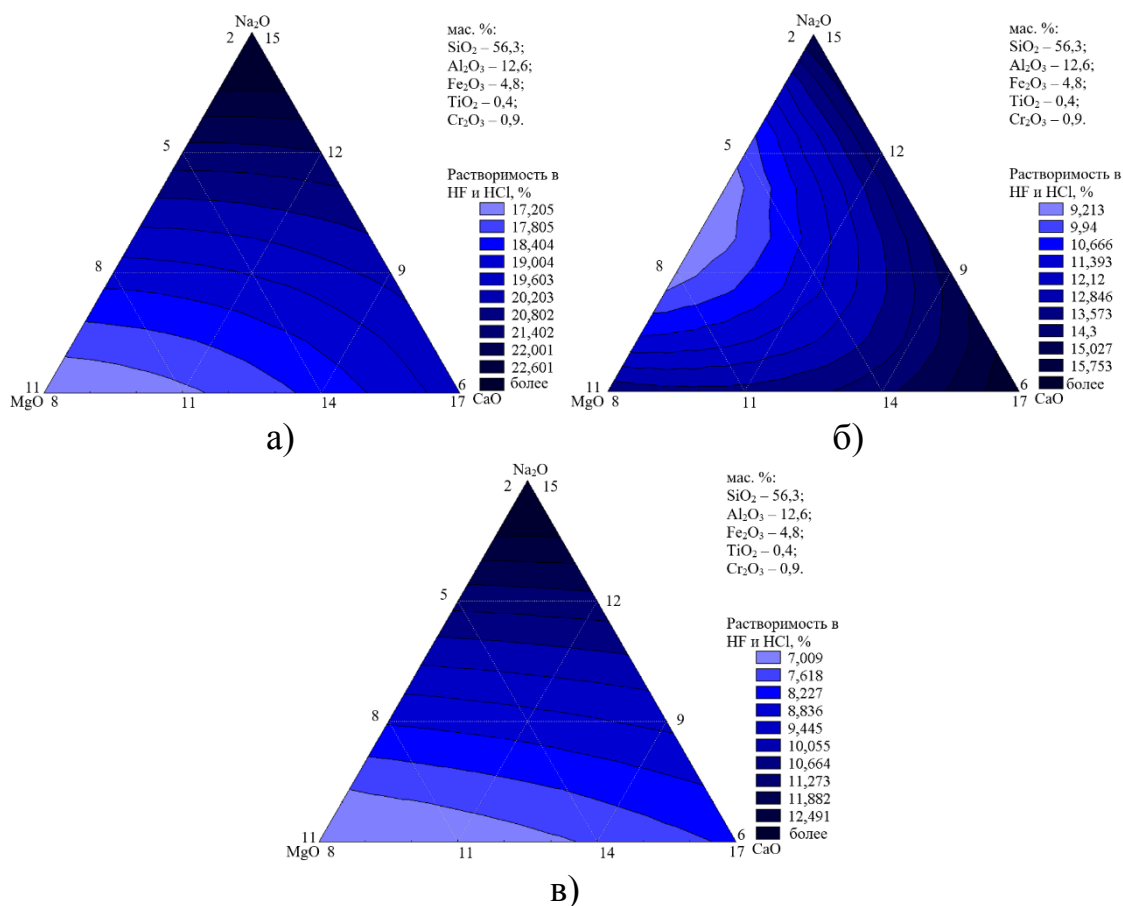


Рисунок 1 – Влияние химического состава и температуры кристаллизации на химическую устойчивость стеклокристаллических пропантов к воздействию HCl и HF, кристаллизованных при температурах 800 (а), 850 (б) и 900 (в) °C

Высокая химическая устойчивость стеклокристаллических пропантов обеспечивается благодаря кристаллизации авгита, который обладает высокой химической устойчивостью за счет насыщения пироксеновой кристаллической решетки химически стойкими элементами. Авгит наиболее активно кристаллизуется при температурах 850–900 °C в области составов, мас. %: R_2O 6–12; CaO – 8–14; MgO – 8–11; Al_2O_3 – 12,61; Fe_2O_3 – 4,8; Cr_2O_3 – 0,9; SiO_2 – 56,3; TiO_2 – 0,41. Полученные стеклокерамические пропанты характеризуются плотной мелкокристаллической структурой, что наряду с химическим и фазовым составом оказывает значительное влияние на повышение их химической устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силин, М.А. Промысловая химия: Учебное пособие / М.А. Силин [и др.]. – М., 2016. – 350 с.

УДК 691.215.1:691.5

М. И. Кузьменков, проф., д-р техн. наук;
А. А. Сакович, проректор по учебной работе;
Д. М. Кузьменков, ст. преп. (БГТУ, г. Минск);
В. И. Вовк, первый зам. ген. директора – гл. инженер
(ОАО «СветлогорскХимволокно»)

СИНТЕТИЧЕСКИЙ ГИПС – АЛЬТЕРНАТИВА ИМПОРТНОМУ ПРИРОДНОМУ СЫРЬЮ

Из-за отсутствия в Республике Беларусь собственной сырьевой базы доля гипсовых вяжущих в балансе минеральных вяжущих – цемента, извести ничтожна мала – не более 1 %, в то время как в Германии, США она достигает 20–25 %, что обусловлено их малой энергоемкостью. Вовлечение в производство гипсовых вяжущих фосфогипса, являющегося отходом производства экстракционной фосфорной кислоты на ОАО «Гомельский химический завод» и накопившемся в отвалах в количестве около 30 млн. тонн технически весьма сложно и экономически не выгодно. В связи с этим для Беларуси перспективным решением данной проблемы является организация производства синтетического $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ на основе местного карбонатного сырья – мела (или техногенного известняка) и избыточного количества отработанной H_2SO_4 .

Такое производство по разработанной нами технологии мощностью 12 тыс. тонн в год запустили в эксплуатацию на ОАО «СветлогорскХимволокно», используя отработанную в производстве жаростойкого волокна «Арселон» серную кислоту и отход дробления известняка на ОАО «Белорусский металлургический завод». Выпущенная по ТУ ВУ 400031289.091-2020 в октябре 2020 г. опытная партия синтетического порошкообразного гипса (табл.) направлена на тестирование на ОАО «Белорусский цементный завод», ОАО «Гродненский комбинат строительных материалов», ОАО «Забудова» и другим потенциальным потребителям. Высокое качество синтетического гипса создает веские предпосылки для получения из него востребованных гипсовых вяжущих – строительного гипса, высокопрочного гипса в виде $\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, растворимого ангидрита $\gamma\text{-CaSO}_4$. Указанные гипсовые вяжущие в настоящее время в Беларуси не производятся, а потребность в них в производстве сухих строительных смесей покрывается за счет импорта.

Специфика технологического процесса получения синтетического гипса по реакции $\text{CaCO}_3 + \text{H}_4\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ придает целевому продукту ряд особенностей, а именно влажность в пределах 12–13 % и высокую дисперсность частиц (300–500 мкм).

Таблица – Основные свойства синтетического гипса

№ п.п.	Наименование показателя	Норма в соответствии с ТНПА	Установлено анализом
1	Содержание гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), % не менее	95	97,0
2	Содержание кристаллизационной воды, % не менее	20	20,3
3	Содержание серного ангидрида (SO_3), % не менее	44	45,1
4	Массовая доля воды, % не более	15	12,5

Эти физические свойства синтетического гипса предопределили выбор способов его конверсии в гипсовые вяжущие.

Для получения строительного гипса $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ наиболее подходящим прототипом нами был выбран роторный кальцинатор, который хорошо себя зарекомендовал в ряде европейских стран при переработке сульфогипса, образующегося при утилизации сернистого газа на ТЭЦ, работающих на каменном угле, содержащем серу. Влажность сульфогипса после вылеживания на складе находится в пределах 12–14 %.

Роторный барабанный кальцинатор представляет собой стальной барабан диаметром до 2 м и длиной до 8 м. В качестве теплоносителя используются дымовые газы, образующиеся в выносной топке при сжигании природного газа. Порошкообразный влажный гипс поступает в пучок труб, расположенных внутри барабана, а теплоноситель движется прямотоком по межтрубному пространству. Вращение барабана обеспечивает постоянное перемешивание порошкообразного материала и равномерный его нагрев, который приводит к дегидратации $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ до $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Получение растворимого ангидритового порошкообразного продукта вполне пригодно на том же технологическом оборудовании, которое функционирует на ОАО «СветлогорскХимволокно» для получения синтетического гипса. Отличительной особенностью синтеза растворимого $\gamma\text{-CaSO}_4$ при осуществлении реакции взаимодействия суспензии известняка с H_2SO_4 поддержание заданного температурно-временного режима в каскаде реакторов. Второй отличительной особенностью получения растворимого ангидрита является его низкая энергоемкость по сравнению с распространенным в настоящее время термическим способом, осуществляемым при температуре 750–800 °С.

Н. М. Шалухо, доц., канд. техн. наук;
М. И. Кузьменков, проф., д-р. техн. наук;
Е. В. Лукаш, ст. преп., канд. техн. наук
М. С. Шинкевич, студ. (БГТУ, г. Минск);
Т. В. Булай, ст. преп. (ГрГУ им. Я. Купалы, г. Гродно)

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТИРАЕМОСТИ И ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ СЕРСОДЕРЖАЩЕГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ БЕТОНА

Гидрофобность, высокая химическая стойкость серы к целому ряду агрессивных сред, в особенности высокая сопротивляемость кислотной и солевой агрессии делают серное вяжущее предпочтительнее цементного для производства изделий, эксплуатирующихся в агрессивных средах. Не менее важным показателем качества любого покрытия является хорошая износостойкость.

На основании ранее полученных результатов по разработке оптимальных составов серных бетонов [1–2] целью данного исследования являлась разработка оптимального состава серосодержащего покрытия с использованием в качестве наполнителей доломитовой муки и гранитных отсеков [3].

Содержанием компонентов варьировали в диапазоне, мас. %: сера – 60–80, гранотсевы и доломит – 10–20. Дисперсность наполнителей оценивалась остатком на сите № 008 не менее 85 %, что обеспечивало необходимую укрывистость и удобоукладываемость серосодержащих расплавов.

Композиционные покрытия получали путем плавления серобетонной смеси при температуре 140–160°C и последующей заливки в форму 7×7 см. Использовали установку ЛКИ-2 в виде круга истирания. Образцы предварительно выдерживали не менее 2 сут, взвешивали и определяли площадь истираемой грани. Результаты представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, наилучшей истираемостью обладает покрытие состава № 1 (70 мас. % серы + 10 мас. % гранотсева + 20 мас. % доломитовой муки). Также, с увеличением содержания гранотсевок в составе покрытий с 10 до 20 мас. % истираемость ухудшалась с 0,07 до 0,11 г/см². Исходя из сравнения истираемости обычного бетона и серосодержащих покрытий, можно сделать вывод о хорошей износостойкости разрабатываемых составов.

Таблица 1 – Составы композиционных покрытий с различными наполнителями и их истираемость

№ состава	Сера, мас. %	Доломитовая мука, мас. %	Гранотсевы, мас. %	Истираемость, г/см ²
1	70	10	20	0,11
2		20	10	0,07
3		15	15	0,09
Бетон	–	–	–	0,9–1,2

Поскольку разрабатываемые составы серосодержащих покрытий могут найти свое применение для устройства полов на молочных заводах, где достаточно агрессивное воздействие на бетон или керамическую плитку для полов оказывает молочная кислота, представляло интерес изучить их стойкость в данной среде.

Образцы бетона размером 2×2×2 см перед пропиткой серосодержащим покрытием, подвергались предварительной обработке – вакуум-сушке. Данный показатель оценивали по изменению массы образцов до и после погружения в агрессивную среду [4]. Использовалась молочная кислота различных концентраций (табл. 2).

Образцы обычного бетона не выдержали испытаний на химическую стойкость и разрушились уже после 3-х суток выдержки в молочной кислоте.

Из табл. 2 видно, что все испытанные образцы серосодержащих покрытий являются устойчивыми к действию молочной кислоты, о чем свидетельствуют незначительные потери массы.

Таблица 2 – Химическая стойкость образцов покрытия в среде молочной кислоты с выдержкой в течение 30 сут

№ состава	Концентрация молочной кислоты, %	Потери массы, Δm, %
1	25	0,0063
2		0,0055
3		0,0031
1	40	0,0068
2		0,0059
3		0,0032
1	60	0,007
2		0,0063
3		0,0055

Наблюдается, что с увеличением концентрации молочной кислоты потери массы образцов, хоть и незначительно, но увеличиваются в пределах каждого состава.

С увеличением содержания гранотсевов в составе покрытий химическая стойкость улучшается, что согласуется с литературными данными об их инертности и меньшей растворимости, по сравнению с доломитом, который является довольно химически активным и способен взаимодействовать с агрессивными средами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобровская Я.А., Шинкевич М.С., Шалухо Н.М. Разработка состава серного бетона и коррозионностойкого покрытия на основе серы // 71-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов: сб. науч. работ – Минск, 20–25 апреля 2020 г. [Электронный ресурс] – Минск: БГТУ, 2020. – С. 329–331.

2. Шинкевич М.С., Шалухо Н.М. Получение коррозионностойкого покрытия на основе серы // 71-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов: тезисы докладов: в 4-х ч. – Минск, 20–25 апреля 2020 г. [Электронный ресурс] – Минск: БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 231.

3. Шалухо Н.М., Булай Т.В., Кузьменков М.И., Кузьменков Д.М., Бобровская Я.А. Использование гранитных отсеков в производстве серного бетона // 5-й Белорусско-Прибалтийский форум «Сотрудничество – катализатор инновационного роста»: сборник материалов, Минск, 9–10 октября 2019 г. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 34–35.

4. ГОСТ 25881-83. Бетоны химически стойкие. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.

УДК 666.9.015.224

М. К. Анкуда, ассист.;

М. И. Кузьменков, проф., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОЛЕВЫХ МИНЕРАЛИЗАТОРОВ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Одним из наиболее перспективных и доступных с коммерческой точки зрения способов интенсификации клинкерообразования является использование доступных минерализаторов. Однако основное количество публикаций посвящены применению индивидуальных солей с этой целью, причем наибольшее внимание уделялось CaF_2 . В то же время известно, что галогениды являются высокоэффективными минерализаторами. Однако термодинамической оценки влияния минерализаторов на процесс формирования клинкерных минералов не проводилось.

Важную роль в процессе обжига клинкера играет очередность формирования промежуточных и конечных фаз. Последовательность и скорость образования различных соединений при повышении температуры в результате взаимодействия сырьевых компонентов между собой и с продуктами, образующимися при термообработке, определяют эффективность минералообразования на последующих стадиях спекания и охлаждения клинкера, а также завершение минералообразования в целом.

Последовательность химических превращений, их принципиальная возможность и направление протекания той или иной химической реакции в твердой смеси, в первую очередь, обусловлены термодинамическими факторами. В основах термодинамического подхода к изучению твердофазовых реакций лежит протекание реакций химического взаимодействия двух кристаллических веществ, направление которых определяется уменьшением термодинамического потенциала.

При термодинамическом исследовании протекания высокотемпературных процессов необходимо учитывать влияние давления, полиморфных превращений исходных компонентов, зависимости энтропии и теплоемкости от температуры.

При использовании фторидов, фосфатов и сульфатов в качестве минерализаторов наряду с клинкерными минералами образуются силикаты и алюминаты кальция, которые в своем составе содержат CaF_2 , P_2O_5 , SO_3 , которые плавятся incongruently с образованием жидкой фазы и клинкерных минералов.

Вероятность протекания тех или иных реакций оценивали по величине энергии Гиббса при определенных температурах. Как известно, для процессов, которые могут происходить в системе, ΔG^0_p характеризуется отрицательной ее величиной: чем больше эта величина, тем более вероятной является возможность протекания этой реакции.

Ввиду того, что многие соединения являются малоизученными, их термодинамические данные не известны. Поэтому для проведения термодинамических расчетов необходимо было получить данные по теплоемкости, энтальпии образования и энтропии соединений. Расчет энтропии и энтальпии соединений проводили с допущением, что их изменение в ходе реакции образования соединения равно нулю. Величины теплоемкостей рассчитывались по специальной методике, разработанной Н.А. Ландией [3].

Анализ проведенных расчетов энергии Гиббса протекающих твердофазовых реакций позволяет сделать следующие заключения:

– термодинамически более вероятными являются реакции образования фтор-, фосфат- и сульфатсодержащих силикатов и алюминатов кальция по сравнению с клинкерными минералами;

– температуры образования фтор-, фосфат- и сульфатсодержащих силикатов и алюминатов кальция ниже температуры образования алита, белита и алюмината кальция.

Таким образом, минерализующее действие фторида, фосфатов и сульфатов заключается не только в снижении температуры образования жидкой фазы, но и в образовании силикатов и алюминатов кальция при более низкой температуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов: учебник для хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.

2. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.

3. Ландия Н. А. Расчет высокотемпературных теплоемкостей твердых неорганических веществ по стандартной энтропии. – Тбилиси: АН Груз. ССР, 1962. – 221 с.

УДК 666.616; 552.11

С.Е. Баранцева, доц., канд. техн. наук;

Ю.А. Климош, доц., канд. техн. наук
svetbar@tut.by (БГТУ, г. Минск)

С.С. Манкевич, ведущий инженер
siarheimankevich@gmail.com (ГП «НПЦ по геологии», г. Минск)

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОПУТНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НОВОДВОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАЗАЛЬТОВ И ТУФОВ

В процессе поисково-оценочных работ, проведенных РУП «Научно-производственный центр по геологии», выявлено новое для Республики Беларусь месторождение базальтов и сапонитсодержащих базальтовых туфов – Новодворское [1]. Установлено, что полезным ископаемым на месторождении являются вулканогенные отложения, сложенные толеитовыми базальтами, туфами основного состава, туффитами и лавобрекчиями. Попутные полезные ископаемые представлены вскрышными породами – песками кварцевыми и полевошпат-кварцевыми четвертичного возраста, песками кварцевыми и алевритами глауконит-кварцевыми палеогенового возраста (рисунок 1).

Разрез	Возраст	Название	Средняя мощность, м
	Q (чет- вертич- ный)	Вскрыша	1,26
		Песок строительный	20,52
	P (палеоген)	Породы глауконитсодержащие (пласт 1)	12,7
		Внутренняя вскрыша	9,1
		Породы глауконитсодержащие (пласт 2)	6,2
	V (венд)	Породы базальтовые (T2+T1)	17,2
		Туф (Т3) Прослой в 70% скважин	5,9
		Породы базальтовые (T2+T1)	6,4
		Туф и туффит (Т3)	26,3

Рисунок 1 – Структура толщи Новодворского месторождения

Предварительно оцененные запасы попутных вскрышных пород по категориям C_1+C_2 составляют 77,098 млн. м³.

Комплексные экспериментально-технологические исследования, выполненные по заданию РУП «Научно-производственный центр по геологии» тремя организациями (УО «Белорусский государственный технологический университет», 2017 г.; Естественнонаучный институт Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 2020 г.; Компания «Базальтовые волокна и композиционные материалы», Украина, 2020 г.) позволило получить разнообразную независимую информацию о перспективности применения базальтовых пород Новодворского месторождения для изготовления материалов широкого диапазона. Это минеральные волокна различных типов, стеклокристаллические материалы, получаемые стимулированной кристаллизацией введением специальных добавок, керамические материалы строительного назначения, изделия из каменного базальтового литья, теплоизоляционные пористые материалы, сварочные флюсы и ряд других нетрадиционных изделий из базальтов и сырьевых композиций с их использованием.

Целью настоящей работы является изучение качества и оценка возможности использования глауконитсодержащих пород вскрыши месторождения базальтов Новодворское (пласт 1, внутренняя вскрыша и пласт 2), приведённых на рисунке 1, в качестве сырья для получения силикатных материалов различного назначения.

Для предварительного исследования РУП «НПЦ по геологии» предоставлены экспериментальные пробы сырьевых материалов, химический состав которых определен ранее в Центре физико-химических методов исследования УО «БГТУ» на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония) (аналитик А.В. Поспелов) при выполнении Филиалом «Институт геологии» работ, проведенных на предмет использования глауконитсодержащих пород в качестве агрохимического сырья. Вышеуказанные породы представлены следующими оксидами, мас. %: SiO₂ 69,01–74,85; Al₂O₃ 6,49–10,74; FeO 11,65–12,06; MgO 1,10–1,56; CaO 0,44–0,86; K₂O 1,47–1,76; MnO 0,19–0,28; CuO 1,39–2,18; TiO₂ 0,53–0,77; Ag₂O 0,25–0,33; SO₃ 1,02–1,14. По гранулометрическому составу породы верхнего и нижнего продуктивных горизонтов (пласты 1 и 2) являются алевритами (размер зёрен 0,05-0,005 мм) и песками (размер зёрен 0,05-2,0 мм). Среднее содержание фракции размерностью >1,0 мм (данные гранулометрического анализа, аналитик Н.С. Завадич) составляет 0,67 мас. % при диапазоне значений 0,05–5,05 мас. %.

Среднее содержание глауконита по рядовым пробам (данные минералогического анализа, аналитик Н.С. Завадич) составляет 11,12 мас. %, в верхнем продуктивном горизонте – 8,25 мас. %, в нижнем – 20,35 мас. %. Он содержится преимущественно в тонкой пелито-алевритовой фракции, помимо него в породе содержатся минеральные формы, вмещающие этот элемент (полевые шпаты и другие глинистые минералы).

На рисунке 2 приведены возможные направления использования попутных полезных ископаемых Новодворского месторождения.



Рисунок 2 – Возможные направления использования глауконитсодержащих песков и алевритов Новодворского месторождения базальтов и туфов

Таким образом, по химическому и минеральному составу глауконитсодержащие породы вскрыши Новодворского месторождения базальтов представляют значительный интерес для использования в качестве основных компонентов сырьевых композиций силикатных материалов различного назначения, что позволит расширить минерально-сырьевую базу Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1 Глауконитсодержащие породы поискового участка Пинский (Беларусь) / О.Ф. Кузьменкова [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования. – Минск: СтройМедиаПроект, 2017. – С. 172–176.

УДК 666.295

Е. А. Костик, мл. науч. сотр.; И. А. Левицкий, проф., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫЕ ГЛАЗУРИ ДЛЯ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ КЕРАМИКИ

Известно применение медьсодержащих компонентов для окрашивания глазурных покрытий, сообщающее им широкую цветовую гамму и фактуру покрытий [1, 2].

Целью исследования является синтез цветных медьсодержащих глазурей для керамических майоликовых изделий широкой цветовой гаммы и разнообразной фактуры (блестящей, полуматовой, матовой), обладающих требуемым уровнем свойств.

Сырьевая композиция для получения глазурей включала следующие компоненты: фритта прозрачная № 189 [3]; медь углекислая основная; продукты пиролиза резинотехнических изделий; глина огнеупорная «Веско-Гранитик».

Фритта глазури включает следующие оксиды, % (здесь и далее по тексту приведено массовое содержание): 68,0 SiO₂; 3,9 Al₂O₃; 8,89 Na₂O; 1,26 K₂O; 0,12 MgO; 17,8 B₂O₃; 0,03 CaO.

Продукты пиролиза резино-технических изделий образуются при пиролизе автомобильных шин при температуре 400±10 °С и включают, %: 2,15 Al₂O₃; 4,29 Fe₂O₃; 3,20 CaO; 0,31 K₂O; 2,92 CuO; 27,84 ZnO; 40,15 C; 9,01 S; ППП составляет 10,13. Продукты пиролиза вводились с целью создания восстановительной среды и повышения декоративных характеристик глазурных покрытий, т. к. предполагается частичное восстановление меди до разных форм окисления и (или) металли-

ческого состояния. Приготовление глазурной суспензии производилось мокрым помолом составляющих глазурной суспензии в микрошаровой мельнице Speedy (Италия) до остатка на сетке № 0056 (10085 отв./см²) в количестве 0,5–0,8 % сырья. Влажность суспензии составляла 43–45 %, рабочая плотность – 1750±10 кг/м³. Глазурь наносилась методом окунания и пульверизации на керамические изделия, прошедшие утильный обжиг при 950 °С и имеющие водопоглощение 16–18 %. Заглазурованные изделия подвергались термической обработке в камерной электрической печи при температуре 1000±5 °С с выдержкой при максимальной температуре 1,0 ч.

Исследования свойств глазурных покрытий производили в соответствии с методиками СТБ 841–2003 «Изделия керамические. Общие технические условия».

Установлено, что содержание CuO в составе сырьевой смеси от 2,5 до 10,0 % обеспечивает покрытиям бирюзовую (2,5 %), серовато-зеленоватую (5,0 %) и зеленую (7,5–10,0 %) окраску. При этом формируются блестящие покрытия, блеск которых составляет 68–97 % и его значения возрастают с повышением содержания CuO в составе сырьевой смеси. Рост содержания CuO до 12,5 % приводит к формированию покрытий зеленовато-черного цвета. Значения блеска возрастают до металлизированного и составляет 100 %. Дальнейшее повышение содержания CuO от 15,0 до 17,5 % приводит к формированию покрытий с зеркальным разливом и очень сильным металлизированным блеском. С ростом содержания CuO от 15,0 до 20,0 % блеск глазурей постепенно снижается и его значения составляют 28–60 %. Дальнейшее увеличение содержания CuO от 22,5 до 25,0 % приводит к формированию матовых металлизированных покрытий черно-серого цвета с блеском 15 и 5 % соответственно указанному количеству введенного CuO.

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии с помощью термоаналитической системы TGA/DSC-1/1600 HF фирмы Mettler Toledo Instruments (Швейцария) установлено наличие ряда эффектов. Так, эндотермические эффекты в области температур 620–715 °С обусловлены изменением теплоемкости образцов вследствие их размягчения. CuO в составах исследованных покрытий действует как сильный пламень, особенно при содержании 2,5–10,0 %. Эндотермические эффекты также небольшой интенсивности с максимумами при температуре 920–985 °С характерны для всех исследованных составов.

Известно, что в воздушной среде при нормальном давлении CuO – тенорит диссоциирует при температуре около 1000 °С по реакции $4\text{CuO} \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O} + \text{O}_2$. Далее, при медленном охлаждении, образуется эвтектическая смесь 32 % CuO и 68 % Cu₂O с температурой плавления около 1080 °С [4]. Кроме того, в расплаве происходит диссоциация

Cu_2O по реакции $2\text{CuO} \rightarrow 2\text{Cu} + \text{O}_2$ с последующим плавлением меди. Этим объясняется наличие эндотермических эффектов на термограммах глазурных покрытий и их смещение в сторону более низких температур. Присутствие оксида меди в различных степенях окисления объясняется разнообразием цветовых характеристик и значений блеска глазури.

Значения температурного коэффициента линейного расширения покрытий с введением CuO незначительно повышаются и находятся в интервале $(56,9-62,4) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Термостойкость покрытий составляет $240-280^\circ\text{C}$.

Значения микротвердости глазури также возрастает с ростом содержания CuO и отвечают значениям $5896-8122 \text{ МПа}$.

Методом рентгенофазового анализа установлено, что глазурные покрытия, содержащие $2,5-7,5\%$ CuO , рентгеноаморфны. При содержании CuO в количестве 10% присутствуют кристаллические образования куприта Cu_2O , а при дальнейшем повышении CuO от 12 до 15% – тенорита. Дальнейшее увеличение количества CuO вызывает формирование только тенорита.

Исследованием методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа JEOL JSM-5610 LV (Япония) установлена морфология глазурного покрытия. Обнаружено присутствие крупнокристаллических таблитчатых кристаллов длиной от 20 до 140 мкм , шириной $6-16 \text{ мкм}$, дендритового и скелетного габитуса. Рост количества введенной в рецептуру глазури CuO приводит как к количественному росту образований, так и росту размеров кристаллов.

Испытания в РУП «Научно-практический центр гигиены» (г. Минск) в соответствии с ИСО 22196-2011 установлено наличие антимикробной активности опытных образцов в отношении штаммов *Escherichia Coli* ATCC 8739 и *Staphylococcus aureus* 5638, составляющая соответственно $2,30$ и $2,26$ единиц.

Глазурные покрытия прошли успешную апробацию в условиях ОАО «Белхудожкерамика» и соответствуют требованиям СТБ 841–2003 «Изделия керамические. Общие технические условия».

ЛИТЕРАТУРА

1. Линдинь, Л.Ф. Штейнс И.Ф. Глазури на основе боратов меди // Неорганические стекла, покрытия и материалы: сб. ст. Рига, 1983. С. 87–92.
2. Page K. Antimicrobial surfaces and their potential in reducing the role of the inanimate environment in the incidence of hospital-acquired infections / K. Page, M. Wilson, I.P. Parkin // J. of Materials Chemistry. – 2009. – Vol.19 – P. 3819–3831.

3. Левицкий, И. А. Легкоплавкие глазури для облицовочной и бытовой керамики: [монография] / И. А. Левицкий. – Минск: БГТУ, 1999. – 394 с.

4. Термический анализ минералов и горных пород / В.П. Иванова [и др.]. – Л. Недра, 1974 – С. 182–187.

УДК 661.634.2

Ш.И. Турдиалиева, д-р философии по техн. наукам, PhD
(ТГТУ, г. Ташкент)

УПАРЕННАЯ ЭКСТРАКЦИОННАЯ ФОСФОРНАЯ КИСЛОТА И ЕЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Основной сферой применения фосфорной кислоты остается производство фосфатных и сложных удобрений, более 90% фосфорсодержащей руды используется именно для этих целей. Среди иных сфер можно отметить звероводство, пищевую, деревообрабатывающую и фармацевтическую промышленность, производство бытовой химии, стройматериалов и др. На долю десяти крупнейших производителей фосфорной кислоты приходится около 45% суммарных мировых мощностей. В основном это интегрированные компании, расположенные вблизи источников сырья (залежей фосфорсодержащих руд). Экстракционный способ производства фосфорной кислоты является преобладающим (95% от общего количества), поскольку он потребляет меньше энергии. Остальные 5% производятся термическим способом. Основным производителем (и потребителем) экстракционной фосфорной кислоты являются США: [1] их доля от общего производства фосфорной кислоты составляет 90%.

В научно-технической литературе [2] имеются сведения о принципиальной возможности получения упаренной ЭФК на основе термоконцентрата фосфоритов Центральных Кызылкумов. Однако состав термоконцентрата, полученного в лабораторных условиях значительно отличается от состава мытого обожженного концентрата Ташкура, производимого на Кызылкумском фосфоритовом комбинате. Кроме того, отличается и состав ЭФК по содержанию основного компонента P_2O_5 и примесей, ощутимо влияющих на реологические свойства фосфорных кислот.

В связи с этим исследовали процесс упарки ЭФК, выпускаемой на ОАО «Аммофос-Максам», состава (вес. %): 19,80 P_2O_5 , 0,31 CaO, 0,44 MgO, 1,41 SO_3 общ., 0,93 SO_3 св., 1,96 Fe_2O_3 , 0,58 Al_2O_3 .

Процесс упарки продукционной ЭФК проводили до заданного содержания P_2O_5 при атмосферном давлении трубчатом кварцевом реакторе, снабженном лопастной кварцевой мешалкой. Обогрев реактора

осуществляли через стенки с помощью специальной электропечи. Были получены упаренные фосфорные кислоты с концентрацией от 24,93 до 57,6% P₂O₅. Исследования показывают, что при упарке ЭФК по достижении концентрации, начиная 35% P₂O₅, появляются нерастворимые частицы и соли, которые выпадают в осадок. С увеличением концентрации P₂O₅ в упаренных фосфорных кислотах количество осадка возрастает. Это говорит о том, что по мере концентрирования исходной ЭФК кристаллизуются фосфаты катионных примесей, сульфат кальция, натрия и калия вследствие снижения их растворимости. Показано, что упаренная кислота с концентрацией 58% P₂O₅ при 30⁰С кристаллизуется. Состав упаренных фосфорных кислот приведен в таблице.

Таблица – Химический состав исходной и концентрированной ЭФК из фосфоритов Центральных Кызылкумов

Концентрация ЭФК (P ₂ O ₅), %	Содержание компонентов, %					
	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃ общ.	SO ₃ св.
19,80	0,31	0,44	1,96	0,58	1,41	0,93
24,93	0,39	0,57	2,48	0,74	1,75	1,20
30,25	0,44	0,69	2,95	0,87	2,12	1,45
34,50	0,54	0,78	3,43	1,03	2,50	1,69
37,00	0,56	0,83	3,66	1,11	2,62	1,76
39,60	0,60	0,89	3,94	1,17	2,80	1,89
41,90	0,62	0,93	4,13	1,25	2,92	2,05
45,00	0,67	1,02	4,49	1,34	3,19	2,19
46,20	0,68	1,03	4,56	1,37	3,31	2,22
46,90	0,71	1,04	4,61	1,41	3,34	2,25
50,09	0,75	1,12	5,01	1,46	3,53	2,42
51,73	0,76	1,17	5,12	1,49	3,64	2,54
54,64	0,82	1,26	5,45	1,63	3,82	2,60
57,60	0,86	1,31	5,73	1,71	4,08	2,85

Для разработки условий хранения, транспортировки и перекачки упаренных ЭФК из одного аппарата в другой мы изучили их реологические свойства (плотность, вязкость). Плотность и вязкость образцов фосфорных кислот изучали в интервале температур 30-100⁰С. Плотность определяли пикнометрическим методом, а вязкость – с помощью вискозиметра ВПЖ с диаметром капилляров 0,99; 1,31; 1,77; 2,10 и 3,55 мм соответственно для концентраций кислот 19,8-34,5; 37,0; 39,6-45,0; 46,2-51,73 и 54,64-57,6% P₂O₅.

Плотность фосфорных кислот сильно возрастает с увеличением их концентраций. Например, при 40⁰С увеличение концентрации ЭФК от 19,8 до 57,6% P₂O₅ приводит к повышению плотности от 1,2320 до

2,0266 г/см³ соответственно. Аналогичная закономерность наблюдается и при других температурах. Повышение температуры от 30 до 100⁰С способствует снижению плотности в зависимости от концентраций упаренных ЭФК примерно в 1,026 – 1,038 раза.

Вязкость упаренных ЭФК, как и плотность, увеличивается с возрастанием их концентраций и снижается с повышением температуры. По мере повышения концентрации ЭФК вязкость кислоты резко возрастает, что особенно заметно при низких температурах и концентрациях выше 46,2% P₂O₅. Например, при 30⁰С вязкость ЭФК, содержащий 37,0% P₂O₅, составляет 16,15 спз, ЭФК с концентрацией 46,9% P₂O₅ – 81,90 спз, что в 5,07 раз выше, а ЭФК с концентрацией 54,64% P₂O₅ – 584,87 спз, т.е почти 36,2 раз больше. Такое резкое изменение вязкости с повышением концентрации P₂O₅ обусловлено значительным снижением содержания в упаренных кислотах свободной воды и соответственно, возрастанием солевой массы растворов. При снижении температуры концентрированной ЭФК (50,69-57,6%) P₂O₅ образуются устойчивые пересыщенные фосфатами полуторных оксидов растворы, обладающие высокой вязкостью. Например, в ЭФК содержащий 45,01% P₂O₅ вязкость при 30⁰С составляет 37,81 спз, а при 100⁰С – 7,32, т.е отношение M₃₀ / M₁₀₀ = 5,16. Для ЭФК с 50,09 и 54,64% P₂O₅ соотношение равно 6,54 и 15,15.

Результаты лабораторных опытов позволяют заключить, что ЭФК из мытого обожженного концентрата Кызылкумских фосфоритов можно упаривать без предварительной очистки от примесей до концентрации 50,09-54,64% P₂O₅. Содержание примесей в упаренной кислоте в зависимости от её концентрации (34,50-54,64% P₂O₅) колеблется в пределах, мас. %: MgO – 0,78-1,26; FeO₃ – 3,43-5,45, Al₂O₃ – 1,03-1,63. При этом упаренные фосфорные кислоты обладают удовлетворительными реологическими характеристиками, она сохраняет достаточную для технологических целей текучесть вплоть до содержания 50,09 – 54,64% P₂O₅. Повышение температуры кислот до 50-60⁰С существенно снижает вязкость упаренных кислот, что создает возможность их использования в производстве жидких комплексных удобрений, двойного суперфосфата и других видов высококонцентрированных фосфорных удобрений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schrödter K., Bettermann G., Staffel T., Wahl F., Klein T., Hofmann T. Phosphoric Acid and Phosphates // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – Wiley, 2008.
2. Бахриддинов Н.С. Жидкие и комплексные удобрения на основе экстракционной фосфорной кислоты из фосфоритов Центральных Кызылкумов: Дис. ... канд. техн. наук – Ташкент, 1991. – 159 с.

ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕЧИ

Многие промышленные печи имеют небольшой коэффициент теплоиспользования, особенно предназначенные для высокотемпературной обработки материалов, который составляет 15-35%. За счет утилизации теплоты уходящих в атмосферу дымовых газов может быть достигнута значительная экономия топлива и энергии.

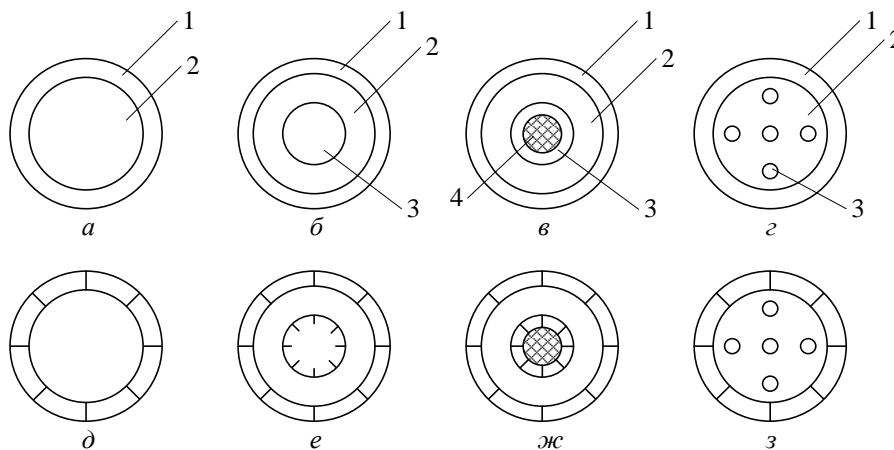
Одним из направлений повышения КПД топливных теплотехнических установок является подогрев воздуха уходящими дымовыми газами. Подогретый воздух может возвращаться в топочное устройство, что повышает КПД установки и экономит 15-25% используемого топлива. Подогретый воздух также используется в качестве теплоносителя в технологических процессах и для теплоснабжения производственных зданий и хозяйственных построек. Теплый воздух можно применять в энергобиологическом комплексе для подогрева грунта и шатра теплиц.

Перенос теплоты от высокотемпературных дымовых газов к воздуху осуществляется в виде сложного лучисто-конвективного теплообмена. Лучистая составляющая дымовых газов определяется через результирующую плотность теплового потока и зависит от степени черноты и поглощательной способности дымовых газов. Наибольший вклад в излучение в промышленном диапазоне температур вносят трехатомные молекулы водяного пара и углекислого газа. Степень черноты и поглощательная способность продуктов сгорания определяются по данным работ [1, 2]. Воздух считается диатермической средой. Конвективная составляющая рассчитывается традиционным методом с использованием уравнений подобия для определения коэффициентов теплоотдачи, как со стороны дымовых газов, так и со стороны нагреваемого воздуха. Физические свойства воздуха и дымовых газов среднего химического состава брались из работы [3].

С помощью разработанной математической модели был проведен вычислительный эксперимент с целью отыскания оптимальной конструкции и параметров утилизатора тепла дымовых газов. Базовым утилизатором является модуль длиной 2,1 м и диаметром 0,9 м, в который поступают уходящие продукты сгорания природного газа при температуре 1000°C с массовым расходом 0,86 кг/с. Массовый расход воздуха составляет 1 кг/с. Расчетная температура окружающей среды принята для теплого периода года равной 21,4°C.

Рассмотрим ряд альтернативных конструктивных схем высокотемпературных воздухоподогревателей с гладкими a - z или оребренными d - z поверхностями теплообмена, которые показаны на рисунке. Высота ребер

в кольцевом канале равна ширине щели между концентрическими окружностями. Схема движения теплоносителей - противоточная. Наружная цилиндрическая поверхность газохода теплоизолированная. Особенностью схем б-г и е-з является наличие двух отдельных потоков нагреваемого воздуха. Для увеличения степени черноты поверхности теплообмена она подвергается механической обработке и окисляется. В этом случае средняя степень черноты равна 0,79 при температуре поверхности 500-1100 К [2].



1,3 – каналы для воздуха; 2 – уходящие продукты сгорания; 4 – вытеснитель

Рисунок – Схемы конструкций воздухоподогревателей с гладкими (а-г) и оребренными (д-з) каналами

Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице.

Таблица – Оптимальные параметры воздухоподогревателей дымовых газов

Номер схемы аппарата	Q/Q_a	d_{er} , мм	d_{eo} , мм	d_{ei} , мм	h_o , мм	t_o , мм	h_i , мм	t_i , мм
<i>a</i>	1,00	900	18,8	–	–	–	–	–
<i>б</i>	0,70	700**	25,0	190	–	–	–	–
<i>в</i>	1,18	300*	10,0*	20*	–	–	–	–
<i>г</i>	1,64	300	10,0*	18**	–	–	–	–
<i>д</i>	1,03	900	18,8	–	9,4	20	–	–
<i>е</i>	1,00	300*	10,0*	590	5,0**	20**	20**	5
<i>ж</i>	1,23	300*	10,0*	20*	5,0*	20*	10*	20*
<i>з</i>	1,72	300	10,0*	18**	5,0	20*	3	3

*Параметр находится на нижней границе области допустимых значений.
**Параметр находится на верхней границе области допустимых значений.

Тепловой поток утилизатора представлен в безразмерной форме (Q/Q_a) в виде отношения действительного теплового потока к тепловому потоку базового утилизатора *a* [4]. В качестве эквивалентного диаметра для труб принимается внутренний диаметр d_{er} , для внешних и внутренних кольцевых каналов – удвоенная ширина зазора d_{eo} и d_{ei}

соответственно. Во всех случаях утилизаторы тепла $d-z$ с оребренными поверхностями теплообмена со стороны воздуха имеют лучшие показатели по сравнению с однотипными гладкими $a-g$. Это объясняется тем, что составляющая радиационно-конвективного теплообмена со стороны дымовых газов выше, чем конвективная со стороны воздуха. Низкую тепловую эффективность по сравнению с прототипом a имеют схемы утилизаторов b и e . Это связано с тем, что в этих конструкциях в излучающем газе эффективная длина луча уменьшается, и доля составляющей теплообмена излучением падает. Схема e становится равноценной схеме a за счет применения оребрения.

Наилучшие показатели имеют утилизаторы z и z с пучком из 80 труб внутри пространства дымовых газов. Эти аппараты на 64 и 72% превосходят прототип a по тепловой эффективности. Следующими по своей эффективности стоят схемы b и $ж$, которые превосходят прототип приблизительно на 20%. Схема z была взята за основу при разработке реального аппарата.

В зависимости от области использования подогретого воздуха, его требуемая температура может изменяться в широком диапазоне. Для унификации предлагается использовать модульную схему воздухоподогревателя, которая набирается из последовательно устанавливаемых секций с отдельным входом холодного воздуха. С ростом числа модулей на выходе температура дымовых газов снижается, что приводит к росту энергоэффективности печи. С учетом направления использования теплоносителя воздуха монтируется требуемое число модулей воздухоподогревателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М.: Мир, 1975.
2. Блох, А.Г. Теплообмен излучением: Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. М.: Энергия, 1991.
3. Тепловой расчет котлов. СПб.: ВТИ-ЦКТИ, 1998.
4. Петровская, Т.С., Технология стекла / В.И. Верещагин, Т.С. Петровская, А.А. Дитц. Томск: Изд-во ТПУ, 2010.

СРАВНЕНИЕ ОПЫТНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ДАВЛЕНИЙ РАДИАЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Производительность и создаваемое давление являются одними из наиболее важных характеристик радиальных вентиляторов. Они не являются общедоступными и допускают некоторые погрешности определения искомых величин, обусловленных графическим изображением аэродинамических характеристик.

Зависимости для расчета динамического P_u , статического P_r давления вентилятора и давления $P_{ц}$, создаваемого центробежной силой, на выходе из рабочего колеса имеют вид

$$P_{u2} = \frac{\rho u_2^2 \sin^2 \beta_2}{1 + \sin \beta_2 \cdot \cos \beta_2}; \quad (1)$$

$$P_{r2} = \frac{\rho u_2^2 \cos^2 \beta_2}{1 + \sin \beta_2 \cdot \cos \beta_2}; \quad (2)$$

$$P_{ц2} = \frac{\rho u_2^2}{2} \left(\frac{\sin^2 \beta_2}{1 + \sin \beta_2 \cdot \cos \beta_2} \right)^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность рабочей среды, кг/м³; u_2 – окружная скорость колеса на выходе среды, м/с; β_2 – угол наклона лопастей на выходе из колеса, град.

Общее расчетное давление нагнетателя определяется суммой указанных составляющих

$$P_{расч2} = P_{u2} + P_{r2} + P_{ц2}. \quad (4)$$

Найденные зависимости являются теоретическими и не учитывают потери давления на входе, выходе и внутри вентилятора.

При движении среды по трубопроводам, через циклоны и узлы другого технологического оборудования сопротивление учитывается коэффициентом ξ . В настоящей работе сопротивление движению среды, снижающее давление вентилятора, также предлагается учитывать с использованием коэффициента сопротивления. Для сравнения выбран радиальный вентилятор ЦАГИ Ц 4-70 № 3, аэродинамические характеристики которого заимствованы из [3].

В результате движения в межлопастном пространстве колеса вентилятора в результате наличия сопротивления движению среды снижается радиальное давление и возрастает тангенциальное давление. Изменяется также давление, создаваемое центробежной силой.

Отношение суммарной скорости движения среды в радиальном направлении с учетом противодействия $c_{2\text{роп}}$ к аналогичной величине без противодействия $c_{2\text{расч}}$ представлено коэффициентом депрессии

$$\varphi = \frac{c_{2\text{роп}}}{c_{2\text{расч}}} . \quad (5)$$

Опытная скорость воздуха на выходе из рабочего колеса вентилятора определяется его фактическим расходом и размерами колеса

$$c_{2\text{роп}} = \frac{V_{\text{оп}}}{\pi d_2 b_2} , \quad (6)$$

где $V_{\text{оп}}$ – опытный объемный расход воздуха, м³/с; d_2 – наружный диаметр колеса, м; b_2 – ширина выходной щели колеса, м.

Суммарная расчетная скорость движения среды в радиальном направлении на выходе из колеса

$$c_{r2\text{расч}} = u_2 \cdot \sin \beta_2 \frac{\sin \beta_2 + \cos \beta_2}{1 + \sin \beta_2 \cos \beta_2} . \quad (7)$$

С учетом коэффициента депрессии опытные давления рассчитывали по формулам

$$P_{u2\text{оп}} = \rho u_2^2 \left[1 + (1 + \text{ctg} \beta_2) \text{ctg} \beta_2 (1 - \varphi) \right] \frac{\sin^2 \beta_2}{1 + \sin \beta_2 \cdot \cos \beta_2} ; \quad (8)$$

$$P_{r2\text{оп}} = \rho u_2^2 \varphi \frac{\cos^2 \beta_2}{1 + \sin \beta_2 \cdot \cos \beta_2} ; \quad (9)$$

$$P_{ц2\text{оп}} = \rho \frac{u_2^2 \varphi^2}{2} \left(\frac{\sin^2 \beta_2}{1 + \sin \beta_2 \cos \beta_2} \right)^2 . \quad (10)$$

Окружную скорость колеса находили по формуле

$$u_2 = \pi d_2 n / 60 , \quad (11)$$

где n – частота вращения колеса, об/мин.

Суммарное опытное давление на выходе из колеса

$$P_{2\text{оп}} = P_{u2\text{оп}} + P_{r2\text{оп}} + P_{ц2\text{оп}} . \quad (12)$$

Разность теоретических расчетных и опытных значений давления, создаваемого вентилятором, с учетом потерь давления на разгон воздуха перед вентилятором:

$$\Delta P_2 = P_{2\text{расч}} - P_{2\text{оп}} - P_{\text{разг}} , \quad (13)$$

где $P_{2\text{оп}}$ – опытное значение давления, создаваемого вентилятором, Па; $P_{\text{разг}}$ – потери давления на разгон воздуха перед вентилятором, Па.

Потери давления на разгон воздуха перед вентилятором

$$P_{\text{разг}} = \rho \frac{w_{\text{вх}}^2}{2}, \quad (14)$$

где $w_{\text{вх}}$ – скорость воздуха на входе в вентилятор, м/с.

Скорость воздуха на входе в вентилятор

$$w_{\text{вх}} = \frac{4V_{\text{оп}}}{\pi d_{\text{вх}}^2}, \quad (15)$$

где $d_{\text{вх}}$ – диаметр входного патрубка вентилятора, м.

Коэффициент сопротивления рассчитывали, приняв за определяющую суммарную скорость движения среды в радиальном направлении на выходе из рабочего колеса

$$\zeta = \frac{2\Delta P_2}{\rho c_{2r}^2 \text{ расч}}. \quad (16)$$

Проведенные расчеты показали, что коэффициенты депрессии и сопротивления зависят коэффициентов полезного действия и имеет практически постоянные величины при одинаковых кпд. Их максимальное отклонение от средних значений не превышает 10%. Максимальное расхождение расчетных и опытных значений давления не превышает 8%.

Предлагаемый метод оценки сопротивления радиального вентилятора соответствует общепринятым подходам и может быть использован при определении давления, создаваемого радиальными вентиляторами при одинаковых или близких углах наклона лопастей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлечко, В.Н. К вопросу о теоретическом давлении радиального нагнетателя / В.Н. Павлечко, С.К. Протасов // ИФЖ. 2014. Том 87, № 6. С. 1448–1454.
2. Павлечко, В.Н. Влияние ускорения Кориолиса на напор радиального нагнетателя / В.Н. Павлечко // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития: материалы международной научно-технической конференции, Минск, 27–29 ноября 2013 г. – Минск: БГТУ, 2013. С. 166–170.
3. Калинушкин, М.П. Вентиляторные установки / М.П. Калинушкин. – М.: Высшая школа, 1962. – С. 226.

УДК 66.021.3

Д.Ю. Мытько, асп.; П.Е. Вайтехович проф., д-р техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ГИДРОДИНАМИКА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГУЛЯРНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗИГЗАГООБРАЗНЫХ НАСАДОК

Исследование регулярно-структурированных насадок является неотъемлемой частью в развитии процессов, связанных с массопередачей в насадочных колонных аппаратах. Ранее в работах [1, 2] была изучена гидродинамика, эффективность массопередачи при десорбции CO_2 и насыщении воздуха парами воды трех видов регулярно-структурированных насадок. Из приведенных конструкций насадочных устройств для проведения дальнейших исследований была выбрана зигзагообразная насадка. Она характеризуется более высокой эффективностью массопередачи и низким гидравлическим сопротивлением.

Задачей дальнейших исследований было определение влияния геометрических размеров зигзагообразной насадки на указанные выше параметры.

Для выполнения поставленной задачи, было изготовлено по три пакета зигзагообразной насадки с длиной стороны ячейки канала 12 мм, 17 мм, 22 мм. Далее будем использовать следующие условные обозначения этих насадок: 3-12, 3-17, 3-20. Стоит отметить, что каждый следующий пакет устанавливался в массообменный аппарат относительно предыдущего с поворотом на 20° . Для сравнения одна из насадок (3-12) устанавливалась сосно, чтобы ячейки располагались одна над другой. Ее обозначим 3-120.

Опыты проводились по методике, изложенной в работе [1].

Гидравлическое сопротивление пакета насадки (без орошения) увеличивается с увеличением скорости газового потока. Максимальная его величина 264,6 Па наблюдается у 3-12. Это объясняется уменьшением свободного сечения из-за того, что боковые стенки каждой ячейки, создают препятствие движущемуся газу.

Анализируя зависимости, полученные при орошении (плотность орошения $q = 15,48 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$) насадок можно отметить, что в диапазоне скоростей газа от 0 до 2,6 м/с наблюдаются устойчивые гидродинамические режимы взаимодействия фаз. Выше скорости 2,6 м/с заметен унос капель жидкости из колонны. При таком режиме работы, происходит инверсия фаз, где сплошной фазой становится жидкая, а газовая переходит в дисперсное состояние [1].

Эффективность массопередачи регулярно-структурированных

зигзагообразных насадок с преобладающим диффузионным сопротивлением в газе (насыщение воздуха парами воды) и жидкости (десорбции CO_2) представлены на рисунке 1.

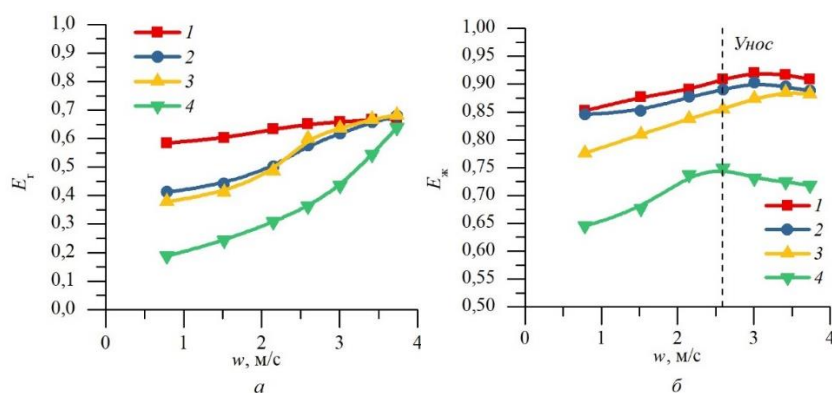


Рисунок 1 – Эффективность массопередачи зигзагообразных насадок:
 a – сопротивление в газовой; b – сопротивление в жидкой
1 – 3-12; 2 – 3-120; 3 – 3-17; 4 – 3-22

Эффективность (рис. 1, а) увеличивается с повышением скорости газа в колонне. Наивысшими значениями на всем промежутке скоростей газа обладает 3-12. Это объясняется высокой плотностью ячеечных каналов на единицу площади поперечного сечения насадки, а также присутствием препятствия в виде тонкой стенки, полученного смещением одного устройства относительно другого. Вследствие этого, падающие струйки и капли разрушаются при столкновении со стенками и образуют мелкодисперсные частицы жидкости, которые контактируют с газом-носителем.

Насадка 3-12 позволяет наиболее эффективно проводить процесс десорбции (рис. 1, б), что объясняется наибольшей удельной поверхностью в единице объема, занимаемого насадкой. Жидкость равномерно распределяется по сечению насадки и в виде тонкой пленки стекает по стенкам. За счет этого снижается сопротивление, сосредоточенное в жидкой фазе, и повышается эффективность массопередачи $E_{ж}$.

Одним из методов оценки эффективности регулярно-структурированных насадок является высота эквивалентной теоретической тарелки (ВЭТТ), которая представлена на рисунке 2. С увеличением эффективности массопередачи уменьшается высота эквивалентная теоретической тарелке. Из рисунка 2 видно, что минимальная высота эквивалентная теоретической тарелке 0,225 м для насадки 3-22 достигается при скорости 2,6 м/с, а для других насадок укладывается в диапазоне от 0,125 до 0,140 м при более высоких скоростях.

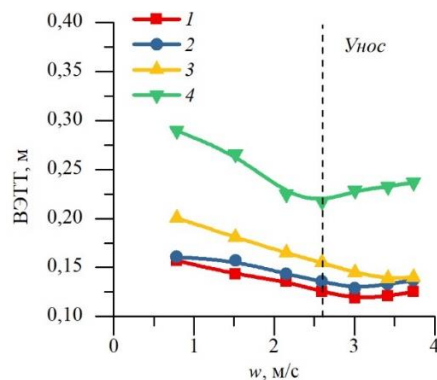


Рисунок 2 – Изменение ВЭТТ разных вариантов насадки (обозначения соответствуют рисунку 1)

Исследования показали, что эффективность массопередачи возрастает с увеличением количества ячеек. Сравнивая эти показатели можно сказать, что для насадки 3-12 оно выше на 1,98% 3-120, на 3,45% 3-17 и на 18,33% 3-22. С уменьшением геометрических размеров ячеек насадки повышается гидравлическое сопротивление. Для орошаемой насадки 3-12 оно выше на 7,14% 3-120, на 26,78% 3-17 и на 44,64% 3-22. Наименьшую высоту эквивалентную теоретической тарелке, при которой достигается максимальная эффективность процесса десорбции имеет 3-12, которая ниже на 0,012 м 3-120, на 0,015 м 3-17 и на 0,112 м 3-22.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Е. Вайтехович, Д. Ю. Мытько Сравнительный анализ эффективности регулярных насадок для массообменных аппаратов // Труды БГТУ. 2020. № 2: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. С. 44–49.

2. Д. Ю. Мытько, П. Е. Вайтехович Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массообменных аппаратов // Вестник Полоцкого государственного университета. 2020. № 8: Строительство. Прикладные науки. С. 33–38.

УДК 66.02

О.А. Петров, доц., канд. техн. наук;
В.И. Козловский, ст. преп., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ КАВИТАЦИОННЫХ ЭМУЛЬГАТОРОВ

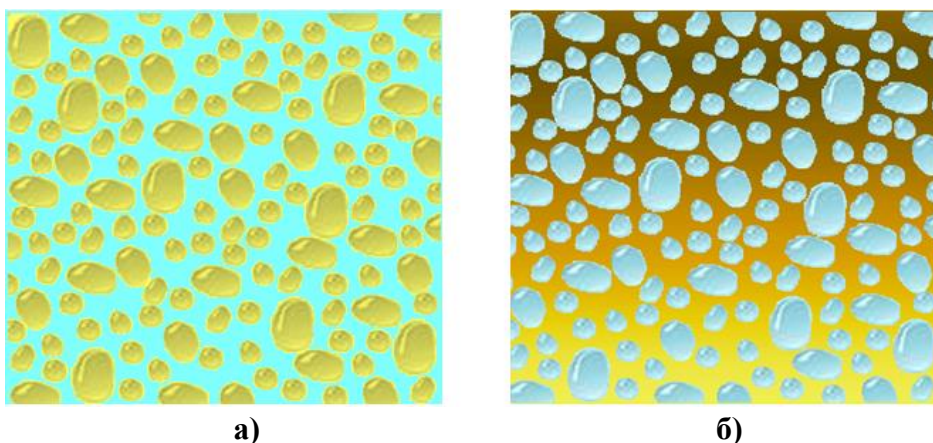
Получение жидко-дисперсных сред является одним из основных этапов в ряде технологических процессов химических и смежных производств (нефтехимические, фармацевтические, лакокрасочные, пищевые и др.) [1]. В некоторых технологиях процессы гидродинамической обработки относительно длительны, энергоемки и требуют интенсифи-

кации. Снижение энерго- и материалоемкости оборудования при достижении требуемой эффективности может быть достигнуто путем использования нетрадиционных технологий, основанных на различных физических явлениях. Особое значение при этом имеет использование кавитации, как одного из наиболее простых и доступных способов гидродинамической обработки материалов. Наиболее значительный эффект может быть достигнут при использовании явления суперкавитации, т. е. создания кавитационных полостей (суперкаверн), замыкающихся за пределами рабочих органов без их кавитационного разрушения. Основное кавитационное разрушающее воздействие возникает благодаря полю схлопывающихся кавитационных пузырьков, генерируемых в большей мере за суперкаверной. Совокупность их микровзрывов при местном изменении давления в потоке жидкости приводит к разрушению частиц обрабатываемого материала, попадающих в область этих микровзрывов. При этом удельные затраты энергии могут быть гораздо ниже по сравнению с традиционно зарекомендовавшим себя оборудованием (аппараты с мешалками, дисковые мельницы, роторно-пульсационные аппараты).

Ранее нами были экспериментально исследованы некоторые конструкции статических суперкавитирующих аппаратов (СК-аппараты), как относительно простых и эффективных для целого ряда технологических процессов, одним из которых является эмульгирование. Кроме того, они также могут быть успешно использованы в совокупности с другими устройствами, в том числе и с прочими конструкциями СК-аппаратов (динамическими, струйными, ультразвуковыми и др.).

В качестве базовой модельной среды была выбрана водомасляная эмульсия, по причине ее доступности и распространенности. Такие эмульсии применяются в качестве смазочно-охлаждающих технических средств, рабочих жидкостей в гидроприводах, используются в фармацевтике, косметологии и др. В зависимости от свойств и назначения, применяются эмульсии двух типов: прямые – М/В, когда масло (дисперсная фаза), раздроблено в виде отдельных мелких капель в воде (дисперсионной фазе) и обратные – В/М (рис. 1). В результате ранее проведенных экспериментальных исследований были получены полустабильные прямые эмульсии различных концентраций без использования эмульгаторов. Причем, при этом был использован статический СК-аппарат, взятый в дальнейшем за базовый вариант при компьютерном моделировании.

Моделирование проводилось в пакете «Flow Simulation» известного программного комплекса систем автоматизированного проектирования «SOLIDWORKS» для моделирования гидродинамики, где применен метод конечных объемов, при формулировке которого используется физическая интерпретация исследуемых величин.



а) **б)**
Рисунок 1 – Типы эмульсий: а) – М/В, б) – В/М

В качестве критерия подобия при исследованиях кавитационных потоков принято пользоваться числом кавитации X , как основным кавитационным параметром, позволяющим объяснить многочисленные и разнообразные особенности явления кавитации. По сути, число кавитации представляет собой отношение давления, под действием которого происходит схлопывание каверны, к давлению, под действием которого каверна возникает и растет. В зависимости от величины X можно различать пять видов потоков: от докавитационного сплошного при $X > 1,05$ до супер- или сверхкавитационного при $X < 0,5$.

Таким образом, была смоделирована гидродинамика кавитационных течений при изменении различных параметров (давления, скорости, температуры) с усовершенствованием конструкции статического кавитационного эмульгатора в сторону снижения числа кавитации. Далее построены зависимости числа кавитации от скорости жидкости, температуры и числа Рейнольдса и получены следующие результаты.

Базовый вариант кавитационного узла представлял собой подобие сопла Вентури в диффузор которого на штоке помещен конический обтекатель. Это известная конструкция СК-аппарата подробно экспериментально и теоретически исследованная нами ранее для различных технологий [1, 2]. Основным недостатком такой конструкции, несмотря на достаточную эффективность, является высокое гидравлическое сопротивление (50 кПа и более, в зависимости от загромождения потока).

Для получения эмульсии, шток с обтекателем предлагается заполнить полым и в него подавать дисперсную фазу (масло). Результаты компьютерного моделирования показали, что сверхкавитационный режим при этом начинается при температуре жидкости более 60°C и скорости в узком сечении сопла более 13 м/с.

Для интенсификации процесса и снижения гидравлического сопротивления предложена конструкция кавитационного эмульгатора с полым

обтекателем и дополнительной закруткой потока. Закрученные потоки характеризуются большим градиентом скоростей по сечению канала, и за завихрителями практически всегда образуется каверна. Поскольку интенсивность разрушающего воздействия повышается, процесс эмульгирования можно проводить при меньших скоростях жидкости, что приведет к снижению гидравлического сопротивления.

Дисперсионная фаза, двигаясь с определённой скоростью, попадает на лопасти завихрителя, где поток закручивается. Закрученный поток проходит сопло, где за счёт центрального сужения увеличивает свою скорость. С высокой скоростью основной компонент огибает обтекатель, создавая область пониженного давления, за ним формируется суперкаверна с полем коллапсирующих кавитационных пузырьков. Так как обтекатель полый, происходит постоянный подсос дисперсной фазы. Две жидкости интенсивно смешиваются и диспергируются, подвергаясь кавитационному воздействию, с образованием эмульсии.

Компьютерные модели показали, что сверхкавитационный режим при этом устанавливается значительно раньше, а при начальной скорости в трубопроводе 5 м/с он оказывается стабильным уже при 20 °С.

Обеспечить дополнительную закрутку потока, интенсифицировать процесс и снизить гидравлическое сопротивление можно с использованием тангенциального ввода дисперсионной фазы в основной трубопровод. Дисперсная фаза также вводится в поток через полый обтекатель. Моделирование гидродинамики такой конструкции кавитационного эмульгатора показало, что сверхкавитационный режим наступает уже при скорости 4 м/с.

Получив некоторый опыт в компьютерном моделировании статических кавитационных эмульгаторов, в дальнейшем планируется продолжить исследования в этом направлении с расширением спектра решаемых задач для усовершенствования конструкций подобного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, О. А. Кавитационные технологии в промышленности. Направления использования / О.А. Петров, В.С. Францкевич, В.И. Козловский // Нефтехимический комплекс. Научно-технический бюллетень. Приложение к журналу «Вестник Белнефтехима». – 2018. – № 1(17). – С. 5–8.

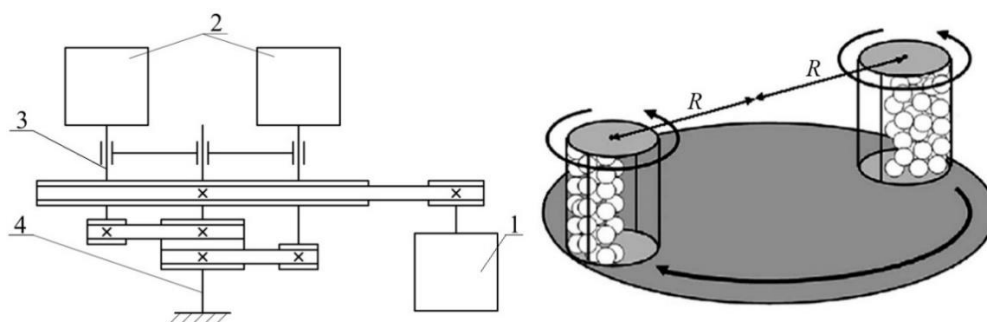
2. Петров, О. А. Статические суперкавитаторы для гидродинамической обработки материалов. / О. А. Петров, П. Е. Вайтехович // Химическая промышленность. – 2004. – Т. 81, № 2. – С. 68–72.

УДК 621.929

Д. С. Черненко, студ; Д. Н. Боровский, ст. преп., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЗАГРУЗКИ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

В качестве объекта для экспериментальных исследований была выбрана вертикальная планетарная мельница периодического действия, кинематическая схема которой представлена на рис. 1. Она состоит из корпуса, электродвигателя 1, крышки, помольных барабанов 2 и планетарного диска [1].



1 – электродвигатель; 2 – барабаны;

3 – собственная ось барабана; 4 – центральная ось

Рисунок 1 – Кинематическая схема планетарной мельницы

Рабочим органом мельницы являются 2 барабана, которые расположены на планетарном диске и вращаются вокруг центральной оси и одновременно вокруг собственных осей в противоположном направлении. В барабаны загружают измельчаемый материал и мелющие тела. В качестве мелющих тел используют стальные шары. Частицы измельчаемого материала претерпевают множество соударений с мелющими телами и стенками барабана. Эффективность планетарной мельницы обусловлена высокой кинетической энергией мелющих тел, благодаря большой скорости их движения создающих высокие напряжения в активированном веществе [2].

Анализ движения загрузки в барабанах планетарной мельницы проводился при помощи программы SolidWorks. При этом принимались барабаны диаметром 120 мм и высотой 90 мм. Мелющими телами являлись шары диаметром 18 мм. Передаточное отношение шестерни-водила к барабану 4:1. Исследования проводились для четырех частот вращения помольного барабана (375 об/мин., 500 об/мин., 800 об/мин. и 1200 об/мин) и различном количестве загрузки.

Результаты расчетов для 5 мелющих тел в планетарной мельнице с горизонтальной осью вращения представлены на рис. 2.

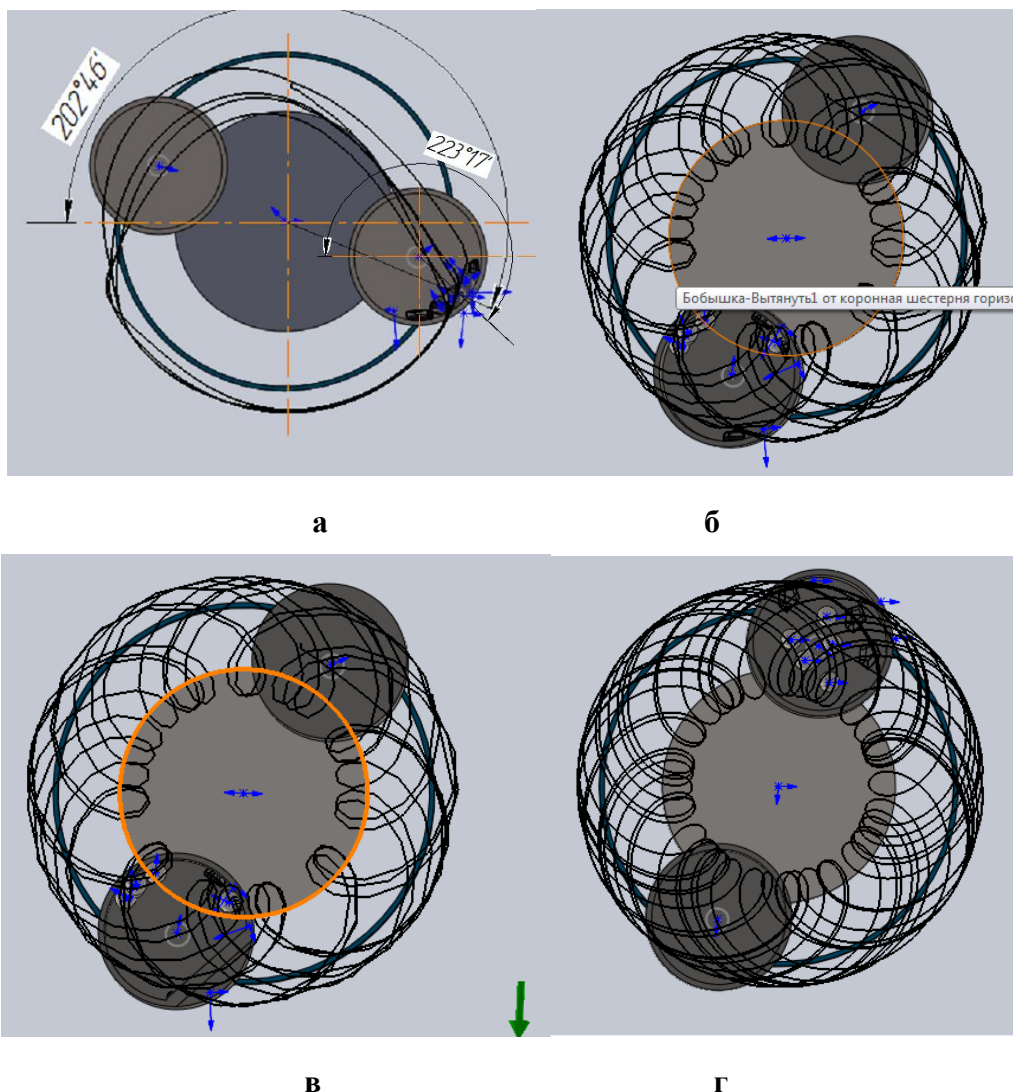


Рисунок 2 – Движения 5 мелющих тел в планетарной мельнице с горизонтальной осью вращения:

а – 375 об/мин.; б – 500 об/мин.; в – 800 об/мин.; г – 1200 об/мин

Проводя анализ движения мелющих тела в планетарной мельнице с горизонтальной осью вращения на (рис. 2). Можем наблюдать переход водопадного режима в центрифугальный (рис. 2, б, в, г). На данных эпюрах траектории с увеличением числа оборотов от 375 до 500 на тело начинает преобладать действие центробежной силы над силой тяжести. Как следствия траектория становится похожей на «цветок». Аналогичные траектории движения были получены и для других степенях заполнения помольных барабанов и наклоном оси барабанов

Также в процессе анализа была определена сила контакта между мелющими телами, стенками помольных барабанов и измельчаемым материалом, которая закономерно возрастает с увеличением частоты вращения, а, следовательно, с ростом центробежной силы (рис. 3).

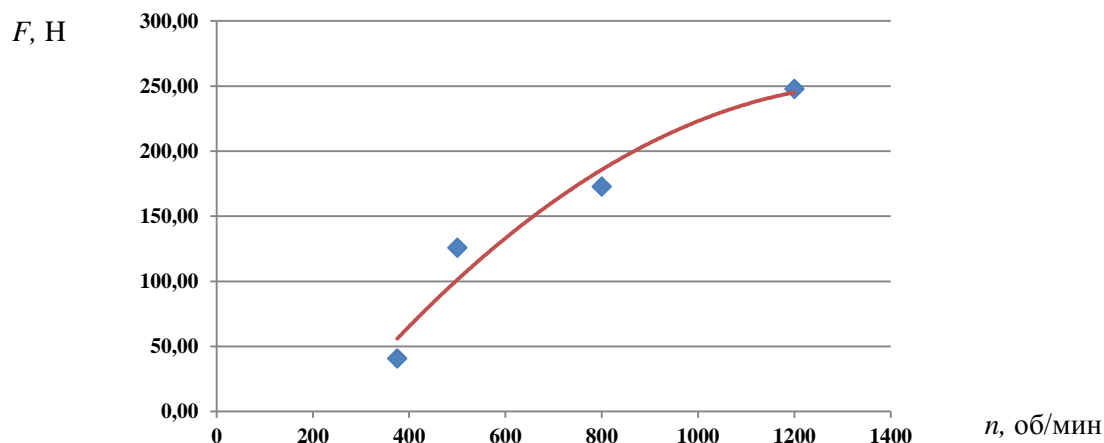


Рисунок 3 – Зависимость силы контакта в планетарной мельнице с вертикальной осью вращения от частоты вращения для 5 мелющих тел

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский, Д.Н. Тонкое измельчение стеклобоя в планетарной мельнице / Д.Н. Боровский, О.А. Петров, А.А. Гарабажиу, Д.В. Семененко // Вестник ПГУ. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – Новополоцк. – №3. – С. 35-38.

2. Семененко, Д. В. Влияние конструктивных и технологических параметров горизонтальной планетарной мельницы на эффективность процесса измельчения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Семененко; Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2014. – 20 с.

УДК 621.391

А. А. Гарабажиу, доц., канд. техн. наук;
 Д. Н. Боровский, ст. преп., канд. техн. наук;
 В. С. Исаченков, ст. преп. (БГТУ, г. Минск);
 Д. В. Клоков, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СУХИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время процессы перемешивания сухих сыпучих материалов и сопутствующее им смесительное оборудование находят широкое применение во многих технологических процессах и отраслях промышленности (например, в химической, фармацевтической, строительной, пищевой, комбикормовой и т. д.).

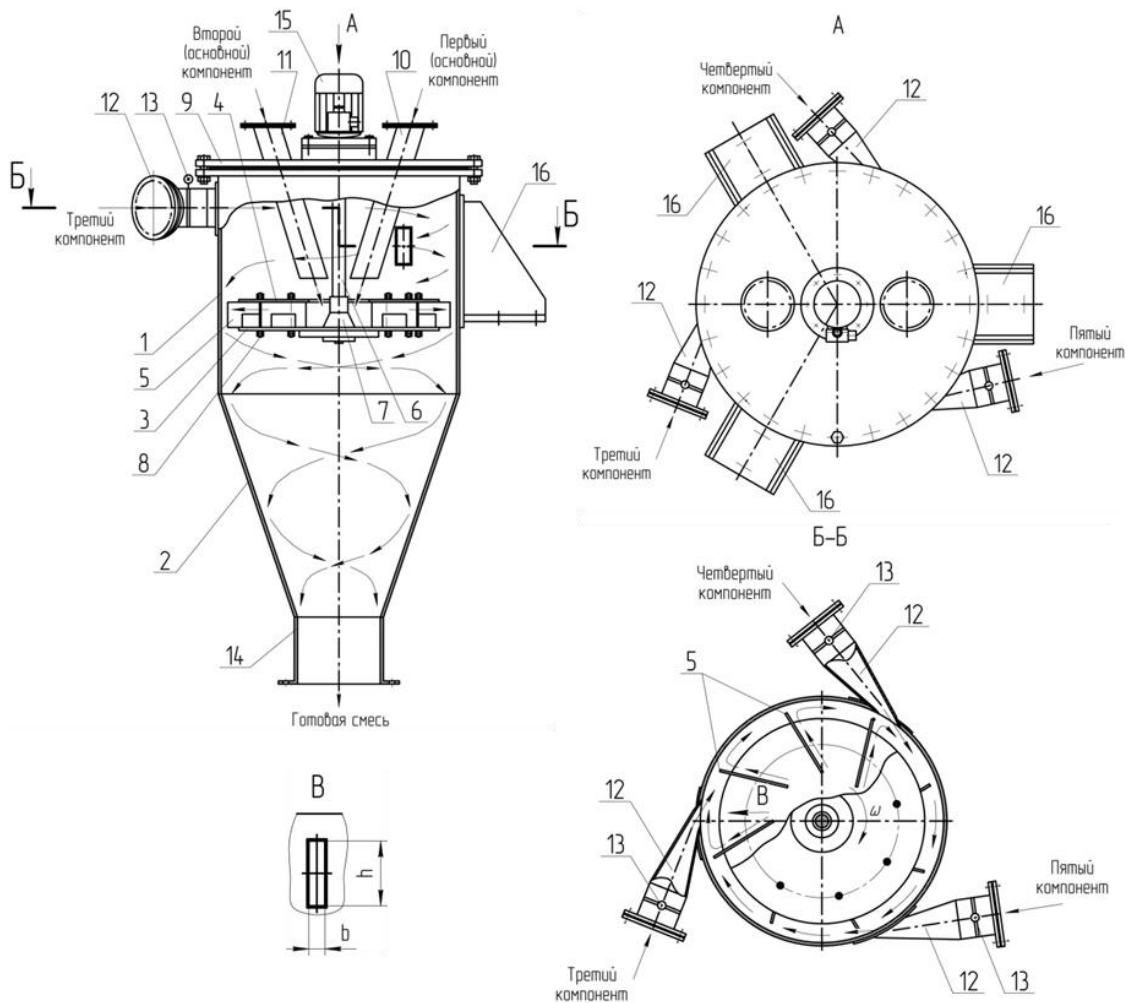
Для большинства вышеперечисленных производств очень актуальной задачей на современном этапе является интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов при снижении их удельной энергоемкости. Данную задачу в большинстве случаев принято решать путем реконструкции или модернизации существующего смесительного оборудования, или же путем создания и внедрения новых высокоэффективных смесительных аппаратов.

Проанализировав большое количество актуальной научно-технической и патентной литературы по проблеме интенсификации процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в различных конструкциях смесительного оборудования, под руководством Гарабажиу А. А. была получена сводная таблица технико-экономической эффективности современного смесительного оборудования [1].

Сравнивая данные сводной таблицы [1] можно отметить, что высокая эффективность перемешивания при относительно низких удельных энергозатратах и времени смешения наблюдается в бипланетарном БСП смесителе, трубном вибросмесителе, в многоярусном центробежно-лопастном, в центробежном прямоточном и в центробежно-ударном смесителях. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что в настоящее время наиболее перспективными для промышленного применения являются именно центробежные смесители.

Проанализировав достоинства и недостатки современных центробежных смесителей, включая собственные более ранние разработки данного вида оборудования, под руководством Гарабажиу А. А. была создана перспективная конструкция роторно-центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих материалов, схема которого представлена на рисунке.

Роторно-центробежный смеситель работает следующим образом (рисунок). После запуска, установленного на плоской крышке 9, электродвигателя 15, через вертикальный вал 6 приводится во вращение горизонтальный ротор смесителя. Далее внутрь корпуса аппарата через патрубки 10 и 11 в плоской крышке 9 нагнетается воздух и на распределительный конус 7 ротора смесителя подаются основные (первый и второй) компоненты смеси. После схода с распределительного конуса 7 частицы первого и второго компонентов смеси попадают на нижний диск 3 вращающегося ротора аппарата. Двигаясь в дальнейшем по ротору или вдоль плоских разгонных лопаток 5, частицы основных компонентов смеси могут перемешиваться между собой, переходя с одной лопатки на другую через специально вырезанные в них окна. Далее, под действием центробежной силы, частицы разбрасываются лопатками 5 на периферию к плоской стенке цилиндрической обечайки 1 корпуса смесителя.



- 1 – цилиндрическая обечайка; 2 – коническая обечайка; 3 – нижний диск;
 4 – верхний диск; 5 – лопатки; 6 – роторный вал; 7 – распределительный конус;
 8 – механизм поворота лопаток; 9 – плоская крышка; 10 (11) – штуцер загрузки
 первого (второго) основного компонента смеси; 12 – штуцера загрузки
 дополнительных компонентов смеси (третьего, четвертого и пятого);
 13 – дозирующие заслонки; 14 – штуцер выгрузки готовой смеси;
 15 – электродвигатель; 16 – опоры-лапы

Рисунок – Роторно-центробежный смеситель со смещенными тангенциальными патрубками и дополнительными окнами в разгонных лопатках

После схода с плоской поверхности лопаток 5 или роторного диска 3 частицы основных компонентов смеси приближаются к стенке цилиндрической обечайки 1 по касательной траектории с наименьшим углом атаки, за счет наклона разгонных лопаток 5 к радиусу аппарата на определенный угол или за счет их закрутки на определенный радиус, и вращения ротора смесителя с определенной скоростью.

С одновременной подачей основных компонентов смеси, происходит самопроизвольное нагнетание внутрь корпуса смесителя через тангенциальные патрубки 12 дополнительных компонентов смеси

(например, третьего, четвертого и пятого) в заданных пропорциях. Патрубки 12 смонтированы ступенчато в верхней части цилиндрической обечайки 1 корпуса смесителя на нескольких параллельно расположенных горизонтальных уровнях, с определенным шагом в вертикальном направлении, и выполнены в форме сужающихся к выходу сопел. При этом патрубки 12 имеют прямоугольное выходное отверстие с существенным преобладанием его высоты h над шириной b .

Далее частицы дополнительных компонентов смеси смешиваются с частицами двух основных компонентов смеси, и перемещаются все вместе по спиралеобразной траектории вдоль стенок цилиндрической 1 и конической 2 обечаек корпуса смесителя сверху вниз к патрубку 14 выгрузки готовой смеси.

Предлагаемая конструкция роторно-центробежного смесителя (рисунок 1) позволит:

- значительно повысить эффективность процесса перемешивания сухих сыпучих материалов в микрообъемах;

- существенно снизить вероятность принудительного измельчения компонентов смеси при их ударе об боковую поверхность цилиндрического корпуса аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарабажиу, А. А. Интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей / А. А. Гарабажиу // Строительная наука и техника. – 2010. – № 4. – С. 27–42.

УДК 66.099.2

Р.И. Ланкин, магистрант;

В.С. Францкевич, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО ГРАНУЛЯТОРА НА ВЫСОТУ ПОДЪЕМА МАТЕРИАЛА

Одним из способов получения NPK-удобрений является гранулирование их в барабанном грануляторе. Этот процесс малоизучен, т. к. для получения комплексных удобрений используется несколько питательных элементов.

Для изучения процесса нужно знать некоторые параметры, один из которых высота подъема материала, которая напрямую влияет на скорость скатывания, благодаря которой происходит сам процесс гранулирования.

На материал внутри барабана действуют 3 силы: тяжести, центробежная и сила трения. На центробежную силу влияет частота вращения барабана.

Моделирование проводилось в программе SOLIDWORKS Motion. Для этого была построена 3D-модель барабанного гранулятора (рисунок 1) с внутренним диаметром 180 мм и длиной 450 мм (отношение длины к диаметру составляет 2,5).

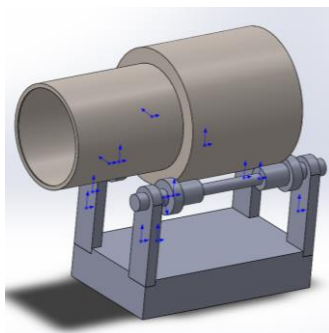


Рисунок 1 – 3D-модель барабанного гранулятора

Моделирование проводилось с использованием гранул близких по параметрам к NPK-удобрений.

Частота вращения барабана изменялась от 20 до 70 об/мин, и наклон оси вращения барабана от 0 до 5°.

В ходе моделирования были получены высоты подъема материала, которые были пересчитаны в проценты (таблица).

Таблица – Результаты математического исследования

Частота вращения барабана n, об/мин	Высота подъема h, %					
	Угол наклона оси вращения °					
	0	1	2	3	4	5
20	3,4	3,5	3,5	3,6	3,8	4,0
25	3,5	3,6	3,6	3,7	3,9	4,1
30	3,9	3,9	4,0	4,2	4,3	4,5
35	4,2	4,3	4,3	4,5	4,7	4,9
40	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,7
45	5,4	5,5	5,6	5,8	5,9	6,4
50	5,9	6,0	6,1	6,3	6,5	6,9
55	7	7,1	7,3	7,5	7,8	8,2
60	7,7	7,8	8,1	8,2	8,7	9,0
65	8,0	8,1	8,3	8,6	8,9	9,3
70	8,6	8,8	8,9	9,1	9,5	9,9

Затем были построены графики зависимости подъема частиц (h) от частоты вращения барабана (n) (рисунок 2) и графики зависимости высоты подъема частиц от угла наклона оси барабана (рисунок 3).

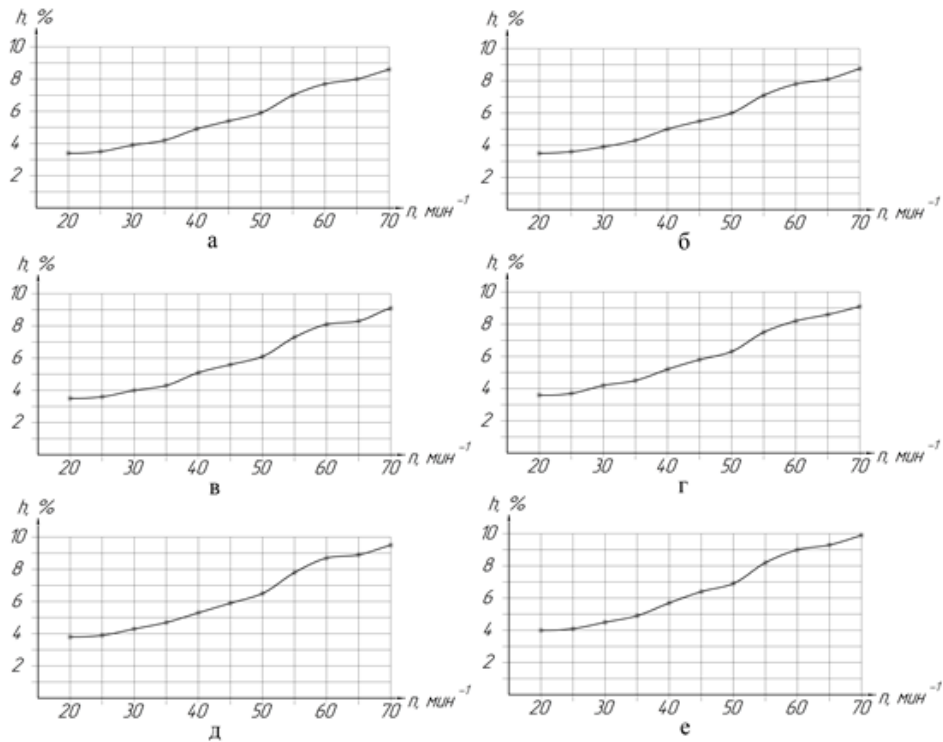


Рисунок 2 – Графики зависимости подъема частиц от частоты вращения, при угле наклона барабана: а – 0° ; б – 1° ; в – 2° ; г – 3° ; д – 4° ; е – 5°

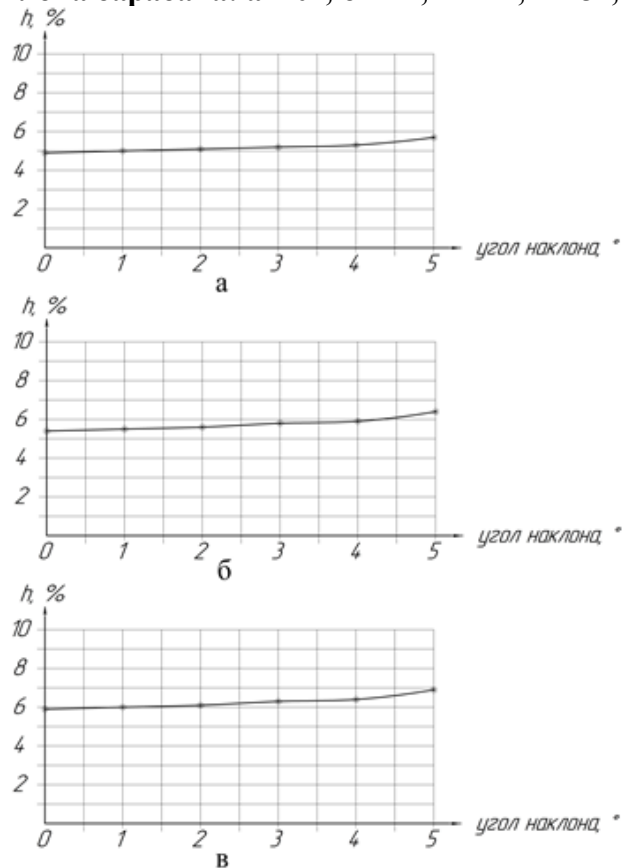


Рисунок 3 – Графики зависимости подъема частиц от угла наклона оси, при угле частоте вращения барабана: а – 40 об/мин; б – 45 об/мин; в – 50 об/мин

Проанализировав графики, видно, что с увеличением частоты вращения барабана, повышается высота подъема материала. При частоте вращения более 50 об/мин материал поднимается слишком высоко, и может происходить перегранулирование, а также с увеличением частоты вращения барабана увеличивается коэффициент трения, при котором может происходить разрушение сформировавшихся гранул. Также из графиков следует, что наиболее оптимальный угол наклона барабана составляет 3-4°, т. к. при большем угле действующая сила тяжести на материал оказывает негативное влияние на траекторию, и материал будет достаточно быстро проходить барабан, в связи с этим будет недостаточное гранулирование.

УДК 66.099.2

Н.А. Высоцкая, асп. (ЗАО «СИПрсОП», г. Солигорск);
В.С. Францкевич, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ШИХТЫ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАНУЛ КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ

Во многих отраслях промышленности, в том числе в сельском хозяйстве широкое применение получили гранулированные материалы [1, 2]. Получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур часто возможно лишь при создании оптимальной системы питания растений и, прежде всего, за счет применения удобрений [3]. В настоящее время в химической промышленности получили широкое распространение процессы гранулирования тонкодисперсных порошков.

НРК – универсальное азотно-фосфорно-калийное минеральное удобрение, содержащее все основные питательные элементы, которые обеспечивают сбалансированное питание растений [4].

Механизм гранулирования. Гранулирование методом окатывания состоит из четырех стадий: 1) смешение исходного порошка с частицами ретур и связующим; 2) образование гранул из мелких частиц и дробление комков; 3) окатывание и уплотнение гранул; 4) упрочнение связей в результате перехода жидкой фазы в твердую (стабилизация структуры гранулы).

Стадии смешения и образования гранул. Связующими выступают различные жидкости, способствующие сцеплению частиц.

При минимальном содержании в сыпучем материале мелких фракций зазоры между крупными зернами остаются почти свободными. С увеличением содержания мелких фракций структура материала становится более плотной, это приводит к возрастанию прочности гранул.

Процесс образования зародыша и формирования гранулы при подаче жидкости в гранулятор имеет следующий вид: капля воды, попавшая в слой материала, под действием капиллярных сил незамедлительно начинает распространяться во все стороны, заполняя при этом поры между отдельными частицами. Вода перестает распространяться в сыпучем материале, как только комок достигнет предельной капиллярной влагоемкости.

Кривые поглощения влаги гранулами двойного суперфосфата диаметром 2-4 мм, помещенными в слой шихты различной влажности с размером частиц 0,1-0,3 мм, представлены на рисунке 1 [5].

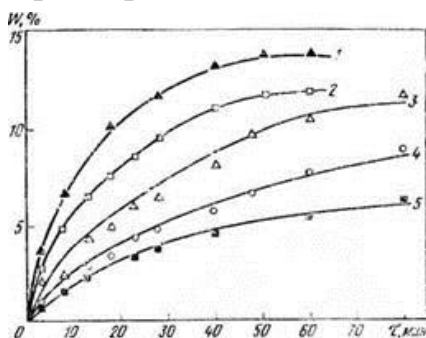


Рисунок – Кривые поглощения влаги гранулами двойного суперфосфата с различной прочностью

приращения влагосодержания в грануле тем выше, чем больше влагосодержание порошка и меньше прочность гранул.

Изменение характера влагопоглощения с течением времени связано с тем, что вначале влага поглощается поверхностным слоем гранул под действием капиллярных сил. По мере насыщения этого слоя влага просачивается внутрь гранулы, где имеются открытые и закрытые поры, заполненные воздухом. Далее поглощение влаги резко замедляется и ограничивается растворением воздуха в жидкой фазе.

Чем выше влагосодержание порошка, тем более интенсивнее насыщается поверхностный слой гранул и тем скорее наступает переход от одного характера влагопоглощения к другому.

Окатывание. Уплотнение частиц методом окатывания происходит при ударе о стенку гранулятора или о неподвижный слой материала. Большая часть кинетической энергии, которую получает комок при скатывании вниз, расходуется на уплотнение гранулы и перемещение зерен. Должен существовать минимальный размер влажного комка, при котором он обладает достаточной кинетической энергией во время ссыпания. Если масса комка меньше критической величины, то приобретенной энергии не хватит для уплотнения.

Структура гранулы уплотняется постепенно под действием большого числа ударов различного направления, в результате чего взаимное перемещение частиц происходит только на тех участках, где в данный момент сила сцепления имеет наименьшее значение.

Стадия стабилизации структуры гранул. Связи между частицами, уплотненные при окатывании, в большей мере обусловлены силами поверхностного натяжения жидкости. Эти связи обеспечивают достаточ-

ную пластичность материалу и позволяют в широких пределах модифицировать форму гранулы без ее разрушения. Для получения готового продукта необходимо упрочнять связи, придавая жесткость полученной структуре. Это достигается удалением жидкой фазы или переводом ее в твердую фазу. Одним из наиболее распространенных способов упрочнения гранул является сушка.

Вывод: Сила капиллярного сцепления в объеме увлажненного сыпучего материала тем ниже, чем из более крупных зерен он состоит. Высокое среднеэффективное расстояние между частицами приводит к понижению прочности сцепления. При увеличении содержания мелких фракций структура материала становится более плотной, прочность гранул возрастает.

Предельный размер образующихся комков прямо пропорционален величине капли и обратно пропорционален пористости слоя материала. Чем выше влагосодержание порошка, тем быстрее насыщается поверхностный слой гранул и тем быстрее наступает переход от одного характера влагопоглощения к другому. Чем больше поверхностное натяжение жидкости и мельче частицы, тем плотнее агломерат. Введение требуемого количества жидкости приводит к увеличению влажности шихты и образованию крупных агломератов. С уменьшением содержания влаги физико-механические свойства агломератов улучшаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прушак, В.Я. Разработка новых технических решений по увеличению выпуска гранулированного хлорида калия с применением валковых прессов, изготавливаемых в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» / В.Я. Прушак, Н.Ю. Кондратчик, Н.А. Высоцкая / Труды БГТУ. – 2020. – Серия 2, № 1. – С. 62-67.
2. Высоцкая, Н.А. Особенности получения NPK-удобрений методом окатывания / Н.А. Высоцкая, В.С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. - № 4. – С. 79-85.
3. Леонов, Ф.Н. Эффективность минеральных удобрений в зависимости от обеспеченности подвижными фосфатами дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / Ф.Н. Леонов, Т.Г. Синевиц // Почвоведение и агрохимия. – 2017. – № 1 (58). – С. 109-116
4. Кондратчик, Н.Ю. Методы гранулирования NPK-удобрений. Способы гранулирования методом прессования и окатывания / Н.Ю. Кондратчик, Н.А. Высоцкая, В.С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. - № 1. С. 56-70.
5. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://msd.com.ua/granulirovanie-materialov/granulirovanie-metodom-okatyvaniya-na-dvizhushhejsya-poverxnosti/> – Дата доступа : 25.01.2021.

УДК 621.926

В.С. Францкевич, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
А.С. Дорогокупец, маг. техн. наук (РУП «Белмедпрепараты», г. Минск)

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОГО МАТЕРИАЛА В СЕПАРАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ СРЕДНЕХОДНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Специфика работы среднеходных мельниц заключается в том, что весь материал, выходящий с вращающегося размольного стола, независимо от размеров частиц должен уноситься потоком воздуха в сепарационную зону и далее в сепаратор. Рассмотрим движение мелкодисперсного материала по запатентованному сепарационному устройству (рисунок 1) с целью определения траектории движения частиц измельченного материала и их скорости на выходе из него. Поставленная задача достигается путем составления математической модели движения измельченного материала по его поверхности.

Исходный мелкодисперсный материал подается через загрузочный патрубок 1 на распределительный конус 2. С конуса материал попадает на вращающуюся тарелку 3, где под действием центробежных сил он попадает под размольные валки 4. Измельченный материал далее вовлекается воздушным потоком в кольцевом зазоре 5 и поднимается вверх вдоль стенки корпуса 6. Поднявшись на некоторую высоту измельченный материал попадает на нижний конус сепарационного устройства 7, где происходит разделение измельченного материала по размерным фракциям.

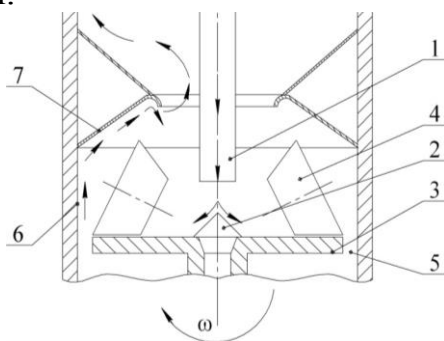


Рисунок 1 – Движение мелкодисперсного материала по запатентованному сепарационному устройству

В общем виде уравнения относительного движения в проекциях на оси цилиндрической системы координат для конуса и для тора сепарационного устройства имеют вид:

$$\begin{aligned} m[\ddot{r} - r(\dot{\varphi})^2] &= P_r - F_{\text{тр}r} \\ m[r\dot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}] &= P_\varphi - F_{\text{тр}\varphi} \\ m\ddot{z} &= P_z - F_{\text{тр}z} - G \end{aligned} \quad (1)$$

После преобразования, окончательно получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_r}{dt} = \frac{P_r}{m} - \frac{f}{m} (-P_r \sin(\alpha) + (P_z - G) \cos(\alpha)) \sin(\beta) + \frac{V_\phi^2}{R} \\ \frac{dV_\phi}{dt} = \frac{P_\phi}{m} - \frac{f}{m} (-P_r \sin(\alpha) + (P_z - G) \cos(\alpha)) \cos(\alpha) \cos(\beta) - \frac{2V_r V_\phi}{R} \\ \frac{dV_z}{dt} = \frac{P_z}{m} - \frac{f}{m} (-P_r \sin(\alpha) + (P_z - G) \cos(\alpha)) \sin(\alpha) \cos(\beta) - g \\ \frac{dR}{dt} = V_r \\ \frac{d\phi}{dt} = \frac{V_\phi}{R} \\ \frac{dz}{dt} = V_z \end{array} \right. \quad (2)$$

Полученную систему дифференциальных уравнений решаем в математическом пакете MATCAD. Апробация разработанной математической модели проводилась при расчете траектории движения материала и его полной скорости при различных скоростях воздушного потока, за которую принималась среднерасходная скорость газового потока в сечении мельницы ($D=250$ мм), от 2,8 до 8,5 м/с. В качестве исходного материала принимался доломит с размером частиц от 2 до 5 мм и плотностью $\rho = 2200$ кг/м³.

При входе на конус (рисунок 2) скорость частицы намного больше скорости воздушного потока, что связано с остатком кинетической энергии приобретенной частицей в кольцевом зазоре мельницы, где скорость потока весьма велика.

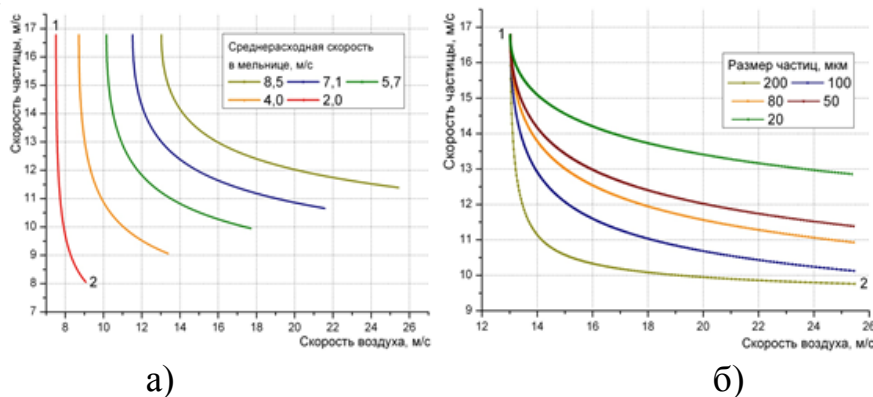


Рисунок 2 – Зависимость полной скорости частицы от скорости воздушного потока: а) при различной среднерасходной скорости воздушного потока (размер частицы 100 мкм); б) при различных размерах измельченного материала (среднерасходная скорость воздушного потока 8,5 м/с)

Далее при продвижении по сепарационному устройству наблюдается увеличение скорости воздушного потока и уменьшение скорости частицы, вследствие уменьшения проходного сечения и низкой среднерасходной скоростью воздушного потока у стенки конуса (так

называемый «пристеночный эффект»), а также воздействия на частицу материала сил трения по поверхности конуса. Расчет движения частиц материала при различных эквивалентных диаметрах (20–200 мкм) при среднерасходной скорости воздушного потока 8,5 м/с, показал, что при заходе частиц на конус сепарационного устройства, их скорость равна между собой и больше скорости воздушного потока, что можно объяснить, уравниванием сил тяжести и аэродинамического воздействия, то есть на частицу большего диаметра действует большая по величине сила тяжести, однако и большая по величине сила аэродинамического воздействия, и для частицы меньшего диаметра наблюдается тот же эффект, только наоборот.

Однако уже при продвижении по конусу, переходе на тор и выходе из него скорости частиц весьма отличны между собой. Это связано с воздействием возникающей в большей мере по отношению к частице размером 200 мкм силы инерции.

Для визуального представления характера движения частиц были построены трехмерные графики (рисунок 3) траектории движения частицы шаровидной формы по сепарационному устройству в целом и по тороидальной поверхности в отдельности при среднерасходной скорости воздушного потока равной 8,5 м/с ($Q = 1500 \text{ м}^3/\text{ч}$) и размере частицы $d = 100 \text{ мкм}$.

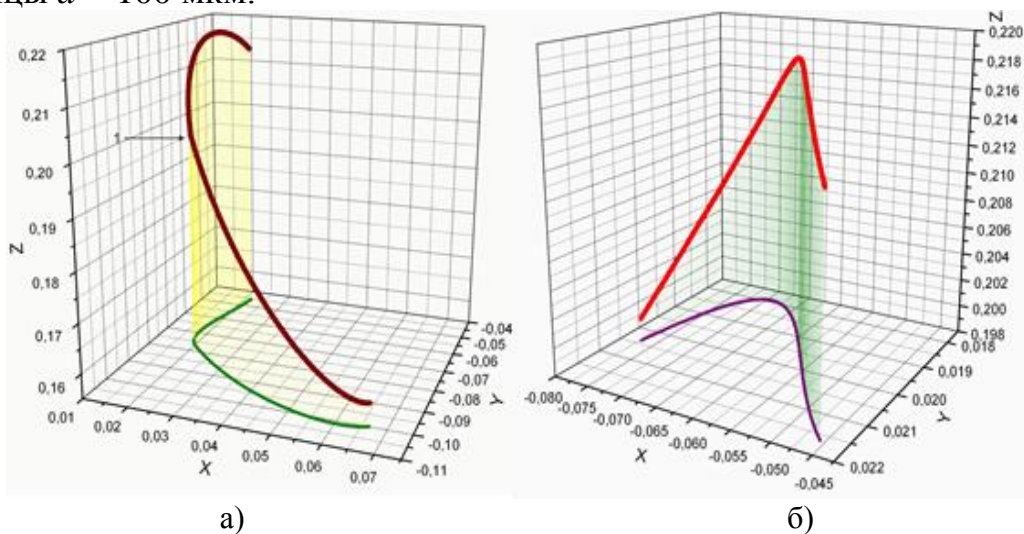


Рисунок 3 – Траектории движения частицы:
а) в целом; б) по тороидальной поверхности в отдельности

Анализируя полученные траектории можно отметить, что при движении частиц полидисперсного материала в закрученном воздушном потоке они практически целиком описывают контур сепарационного устройства, что свидетельствует о нормальной работе предложенного сепарационного устройства, а также о легкости регулировки тонины помола изменяя только скорость движения воздушного потока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ДРОБЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ОТХОДОВ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

Проблема переработки изношенных автомобильных шин и вышедших из эксплуатации резинотехнических изделий имеет большое экологическое и экономическое значение для всех развитых стран мира, а невосполнимость природного нефтяного сырья диктует необходимость использования вторичных ресурсов с максимальной эффективностью [1].

В наиболее развитых странах (США, Японии, Германии, Швейцарии и др.) уже довольно длительное время эксплуатируются опытно-промышленные установки по пиролизу шин мощностью 7–15 тыс. т. в год по сырью [2]. Однако в результате процесса пиролиза образуется твердый остаток в виде технического углерода, который необходимо подвергнуть дополнительной обработке.

Дробление является наиболее привлекательным методом переработки твердого углеродного остатка, поскольку он позволяет максимально сохранить физические свойства в продуктах переработки [3].

Целью работы являлось определение рациональных параметров процессов дробления твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий в щековой дробилке ШД-10 со сложным качанием щеки.

Анализу подвергался твердый продукт пиролиза, полученный на установке низкотемпературного пиролиза резинотехнических изделий ООО «РТСгрупп», с влажностью 4,50–5,50 % двух фракций: 7–16 мм и частицы с размером более 16 мм.

Проведение анализа включало изучение влияния следующих показателей на степень измельчения материала: изменение производительности; зазора между щеками дробилки и фракционного состава подаваемого материала. Определение степени измельчения твердого углеродного остатка проводилось при помощи ситового анализа с использованием сит с размерами ячейки, мм: 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063; 0,045.

На рисунке 1 представлена графическая зависимость гранулометрического состава при различном зазоре между щеками, при измельчении фракции > 16 мм и подаче материала – 200 кг/ч.

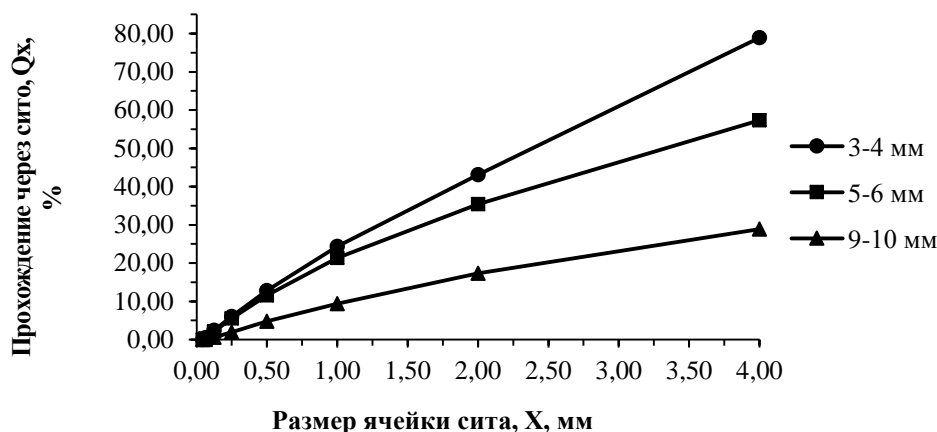


Рисунок 1 – Графическая зависимость гранулометрического состава при различном зазоре между щеками

В результате эксперимента было выявлено, что при увеличении зазора между щеками до 5–6 мм, в измельченном материале наблюдаются куски материала призматической формы с размерами 100×60×5 мм. Это объясняется слоистой структурой материала. При уменьшении зазора до 3–4 мм наблюдается накапливание материала в объеме дробилки и увеличение времени измельчения материала, что говорит о возможности применения двухступенчатого грубого измельчения материала с различными зазорами между щеками.

На рисунке 2 представлена графическая зависимость изменения гранулометрического состава при различной производительности измельчения материала фракции 7–16 мм и зазоре между щеками 3–4 мм.

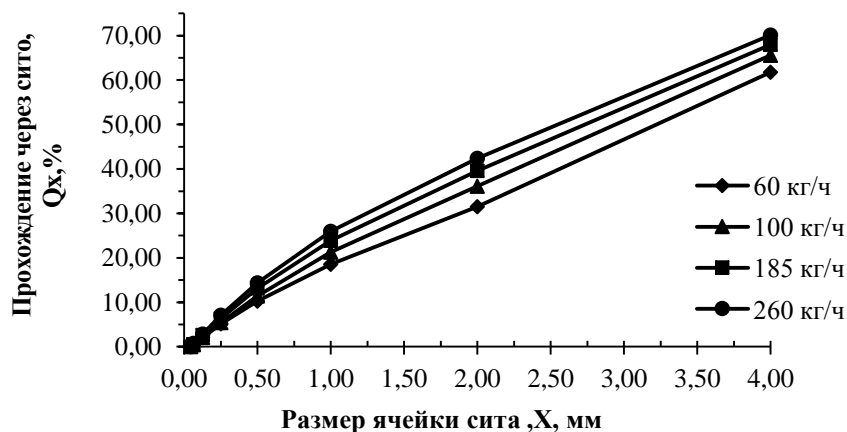


Рисунок 2 – Графическая зависимость изменение гранулометрического состава при различной производительности и зазоре между щеками 3–4 мм

Как видно из рисунка 2, при зазоре между щеками 3–4 мм, производительность не значительно влияет на степень измельчения. Также было замечено, что при увеличении производительности возрастает степень измельчение материала. Это можно объяснить накапливанием

твердого продукта пиролиза в рабочем объеме дробилки, что способствует воздействию на материал дополнительных сжимающих нагрузок за счет сложного движения подвижной щеки.

По результатам проведенных исследований были определены рациональные параметры процесса дробления твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий, в частности оптимальной производительности. Было выявлено что дробление при зазоре между щеками 3–4 мм является наиболее пригодным для первичного измельчения материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные экологические и экономические проблемы утилизации отработавших автомобильных шин: материалы междунар. научно-техн. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в Рос.: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ», секция 10, М., 27–28 марта 2010 г. / МГТУ; под ред. Бахмутова С.В. [и др.]. – М., 2011. – 139 с.

2 Тарасова Т.Ф., Чапалда Д.И. Экологическое значение и решение проблемы переработки изношенных автошин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – Т. 2. – № 2. – С. 130–135.

3 Луговой, Ю. В. Каталитический пиролиз полимерного корда изношенных автомобильных шин в присутствии хлоридов металлов подгруппы железа / Ю. В. Луговой, Ю. Ю. Косивцов, Э. М. Сульман // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51, вып. 12. – С. 73–76.

УДК 621.928.37+621.928.93

В.В. Кузьмин, канд. техн. наук, доц.;
В.С. Францкевич, канд. техн. наук, зав. кафедрой;
И.Б. Лепесбаев, магистрант (БГТУ, г. Минск)

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЦИКЛОНОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Большая часть гидравлических потерь, имеющих место при очистке газа от пыли в циклонах, обусловлена интенсивным вращательным движением покидающего циклон газового потока. Для рекуперации кинетической энергии этого движения можно использовать специальные раскручивающие устройства, позволяющие существенно снизить гидравлическое сопротивление циклонов [1]. В то же время, поскольку установка таких устройств сопровождается дополнительными

капитальными затратами, нужно просчитывать экономическую целесообразность их применения.

Экономический эффект от использования энергосберегающих устройств определяется прежде всего стоимостью электроэнергии. Для промышленности Республики Узбекистан стоимость эта относительно невелика, составляя 450 сум за 1 кВт·ч (соответствует $\approx 0,043$ доллара США). С другой стороны, стоимость циклонов и в целом металлоизделий для вентиляционных систем, относительно высока, т. к. они в основном поставляются из России.

Энергетические затраты на очистку газа в циклоне N [2]:

$$N = \frac{\Delta P \cdot Q}{1000 \cdot \eta_e \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{дв}}} \tau, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1)$$

где Q – производительность циклона (расход очищаемого газа), м³/с; $\eta_e, \eta_n, \eta_{\text{дв}}$ – КПД вентилятора, передачи и двигателя соответственно; τ – количество часов работы; ΔP – гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta P = \xi \frac{w^2 \cdot \rho}{2}, \text{ Па}, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления циклона; w – условная скорость газа в циклоне, м/с; ρ – плотность очищаемого газа, кг/м³.

Производительность связана с диаметром циклона и количеством циклонов в группе n (для одиночного циклона $n = 1$) соотношением:

$$Q = n \cdot w \frac{\pi D^2}{4}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3)$$

Экономия на электроэнергии при использовании раскручивающего устройства:

$$\Delta \mathcal{E} = N \cdot \varepsilon \cdot C_э, \text{ сум.}, \quad (4)$$

где $C_э$ – стоимость электроэнергии, сум за кВт·ч; ε – доля, на которую снижается ΔP ; $\varepsilon = 0,275$ для ЦН-15 [1].

Выразим $\Delta \mathcal{E}$ через диаметр циклона:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{\xi (w^2 \cdot \rho / 2) \cdot n \cdot w (\pi D^2 / 4)}{1000 \cdot \eta_e \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{дв}}} \tau \cdot \varepsilon \cdot C_э = \frac{\pi D^2 \cdot \xi \cdot w^3 \cdot \rho \cdot n}{8000 \cdot \eta_e \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{дв}}} \tau \cdot \varepsilon \cdot C_э \quad (5)$$

Геометрическое подобие циклонов разного диаметра (без бункера и коллекторов газа) и раскручивающих устройств к ним позволяет приближенно принять их стоимость и массу при одинаковой толщине стенки пропорциональной диаметру циклона во второй степени. Масса двухлопастного раскручивателя [1] с удлиненной частью выхлопной трубы для наиболее распространенного типа циклона ЦН-15 составит $31,2D^2$ кг

(где D – диаметр циклона в метрах) при толщине листа для изготовления раскручивающего устройства 1 мм, толщине стенки удлиненного наружного участка выхлопной трубы равной 3 мм и плотности стали 7850 кг/м³. Стоимость определим пропорционально металлоемкости исходя из стоимости циклона [3], выразив в виде $31,2D^2 \cdot C$, где C – стоимость, приходящаяся на 1 кг массы. С учётом дополнительные затрат (например, на монтаж) капитальные затраты на установку раскручивающего устройства ΔK примем на 25% выше [3] его стоимости, т.е. $\Delta K = 39D^2 \cdot C$.

Тогда продолжительность работы циклона, за которую окупится раскручивающее устройство (т.е. при условии $\Delta K = \Delta \Xi$), без дисконтирования денежных потоков:

$$\tau_{ок} = \frac{312 \cdot 10^3 \cdot C \cdot \eta_{\epsilon} \cdot \eta_n \cdot \eta_{ог}}{\pi \cdot \xi \cdot w^3 \cdot \rho \cdot n \cdot \epsilon \cdot C_3}, \text{ ч} \quad (6)$$

Величина ξ зависит от организации выхода очищенного газа из циклона. Для одиночного циклона при выходе очищенного газа в атмосферу $\xi = 163$ для ЦН-15, в групповых циклонах с воздухоборником ξ увеличивается на 35 [2, 4]. Расчет проведем по величине ξ для одиночных циклонов, на которых получены значения ϵ . При использовании раскручивающих устройств в групповых циклонах с воздухоборником энергосберегающий эффект, как ожидается, будет выше, вследствие снижения гидравлического сопротивления воздухоборника, поскольку взаимодействие в нем выходящих из соседних циклонов встречно закрученных потоков вызывает, видимо, значительные гидравлические потери тут и объясняет существенное увеличение ξ .

Исходя из рыночной стоимости циклона ЦН-15 значение C составит около 59 тыс. сум с учётом доставки. Примем $\rho = 1,2$ кг/м³, КПД вентиляторного агрегата (произведение η_v , η_n и $\eta_{дв}$) равным 0,6. Рекомендуемое значение w равно 3,5 м/с, а при улавливании абразивной пыли 2,5 м/с [2]. С учетом принятых величин при $w = 3,5$ м/с величина $\tau_{ок} \approx 3400$ ч, т.е. простой срок окупаемости раскручивающего устройства при непрерывной работе оборудования составит менее полугода. При малом количестве часов работы – например при односменном графике работы с двумя выходными ($\tau \approx 2080$ ч в год), срок окупаемости увеличится примерно до полутора лет.

При $w = 2,5$ м/с продолжительность работы циклона, за которую экономия на электроэнергии уравнивается с величиной дополнительных капитальных затрат на раскручивающее устройство, увеличится уже до ≈ 9300 ч, а простой срок окупаемости при односменном графике работы до 4,5 лет. Дисконтированный срок окупаемости в таком случае при ча-

сто принимаемой для расчета в постоянных ценах ставке дисконтирования равной 0,1 составит около 6 лет.

Таким образом, при $\tau > 2000$ ч в год и близком к нормативному (10 лет и более [5]) сроке службы циклона, применение раскручивающих устройств можно считать экономически выгодным. При меньших значениях или существенном отклонении других величин от принятых для обоснования применения потребуются уточняющие расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мисюля, Д. И. Влияние раскручивающего устройства на эффективность очистки в циклонах / Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 37–39.
2. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справочник / В. А. Лазарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: Фирма ОЗОН-НН, 2006. – 320 с.
3. Альперт, Л. З. Основы проектирования химических установок: учеб. пособие для учащихся химико-механических специальностей техникумов / Л. З. Альперт. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1989. – 304 с.
4. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации / под науч. ред. В. Н. Ужова. – Ярославль: Верх.-Волж. книж. изд-во, 1970. – 95 с.
5. Временный республиканский классификатор амортизируемых основных средств и нормативные сроки их службы. – Минск: ИВЦ Минфина, 2007 – 120 с.

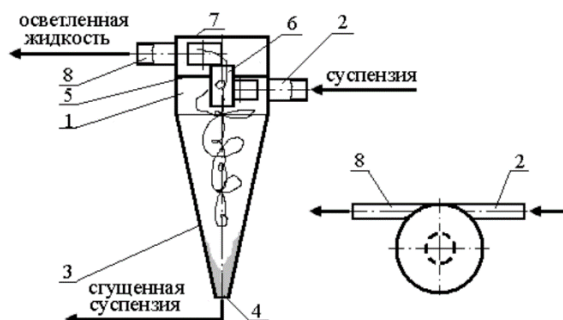
УДК 667.6

А.Д. Санько, магистрант (ОАО «Беларуськалий»);
В.С. Францкевич, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ ПЕСКОВОЙ НАСАДКИ ГИДРОЦИКЛОНОВ ПРИ СГУЩЕНИИ СУСПЕНЗИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ

Гидроциклоны используются для разделения (сгущения) грубых суспензий, а также для классификации суспензий, грубого разделения нестойких эмульсий. Схема гидроциклона для разделения суспензий представлена на рисунке 1. Гидроциклон имеет короткий цилиндрический корпус 1 с тангенциальным патрубком 2 для ввода суспензии и коническим днищем 3 с малым углом онустности. Днище заканчивается отверстием – песковым патрубком 4 (штуцером отвода сгущенной суспензии). Корпус 1 разделен кольцевой перегородкой 5 с патрубком 6 на

две секции и сверху закрыт крышкой 7. Патрубок 2 вмонтирован в нижнюю секцию корпуса, а в его верхней секции установлен тангенциальный патрубок 8 для отвода осветленной жидкости.



1 – корпус; 2 – патрубок для подвода суспензии; 3 – днище; 4 – песковой патрубок; 5 – кольцевая перегородка; 6 – патрубок; 7 – крышка; 8 – патрубок для выхода осветленной жидкости

Рисунок 1 – Гидроциклон

Насадки являются сменными деталями различного сечения или же предусматривается возможность регулирования сечения насадок. Один из способов такого регулирования показан на рисунке 2. При нагнетании воздуха или масла в кольцевую полость резинового манжета сечение насадки для прохода песков уменьшается. Таким способом возможно автоматическое регулирование работы гидроциклона.

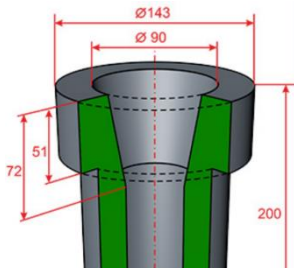


Рисунок 2 – Песковая насадка

Разгрузка слива из гидроциклонов происходит самоотекотом через сливной порог, а разгрузка песков – непрерывная через песковые насадки или с применением разного рода затворов периодического действия. Возникающая при вращении пульпы благодаря тангенциальной подаче питания центробежная сила выводит частицы из потока к наружной стенке циклона. Поскольку скорость радиальной миграции частиц пропорциональна плотности частиц и их диаметру в квадрате, то более крупные и более тяжелые частицы успевают выйти из ядра потока, а мелкие, в основной своей массе, остаются в ядре потока. В результате крупная фракция частиц выгружается через песковую насадку. В процессе работы гидроциклонов было установлено, что диаметр отверстия песковой насадки практически не влияет на объемную производительность гидроциклона, однако является важным параметром регулирования процесса обесшламливания. Удельная нагрузка на песковую насадку в среднем не должна превышать 0,5-1,0 т/(ч·см²). При работе гидроциклонов на сравнительно плотных пульпах, что характерно для обогатительных фабрик, из-за стесненных условий движения частиц их концентрация неравномерно

распределяется в объеме аппарата – плотность пульпы, крупность и плотность твердых частиц увеличиваются в направлении от геометрической оси гидроциклона к его стенкам и от сливного патрубка к песковой насадке.

В объеме работающего гидроциклона можно выделить четыре зоны: зону песков, которая занимает пространство вблизи песковой насадки; зону питания исходной пульпы, располагающуюся концентрически внутри зоны песков; промежуточную зону, в которой крупность твердой фазы и плотность пульпы изменяются от крупности и плотности исходной пульпы до крупности и плотности слива; зону слива, находящуюся непосредственно под сливным патрубком.

В зависимости от конструкции гидроциклона (в частности от угла конусности) и от условий работы относительный объем этих зон может существенно изменяться.

Основным фактором, определяющим показатели работы гидроциклона при обработке рядовых пульп обогатительных фабрик, является отношение диаметра песковой насадки к диаметру сливного патрубка, которое называется разгрузочным отношением. С увеличением разгрузочного отношения увеличивается выход частиц, понижается их крупность и содержание твердой части, соответственно этому уменьшается крупность слива и его выход. Эффективность классификации достигает максимума при оптимальном разгрузочном отношении.

Существует два способа регулировки производительности гидроциклона: изменением разгрузочного отношения A/d (производится за счет изменения диаметра песковой насадки, однако при постоянном давлении на входе объемная производительность гидроциклона изменяется несущественно); изменением диаметра сливного патрубка d (производительность гидроциклона изменяется прямо пропорционально этому диаметру). При изменении объема исходного питания (a , следовательно, и давления на входе) изменяется нагрузка на песковое отверстие. При слишком большом объеме, песковая насадка может оказаться перегруженной и часть песков уйдет в слив. При слишком малом объеме питания и соответственно давлении, близком нулю, через песковую насадку будет уходить исходная пульпа. Исходя из этого экспериментальным путем устанавливается оптимальное входное давление для работы гидроциклонов. Все эти нюансы учтены при выборе песковых насадок используемых в гидроциклонах при сгущении сгущении суспензии в производстве калийных удобрений на ОАО «Беларуськалий».

УДК 66.02

Д. Г. Калишук, доц., канд. техн. наук; И. С. Рахматуллаев, магистрант;
Н. П. Саевич, доц., канд. техн. наук; Ж. Р. Ниёзов, магистрант
(БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУХИХ ТАРЕЛОК СО СТАЦИОНАРНЫМИ КЛАПАНАМИ

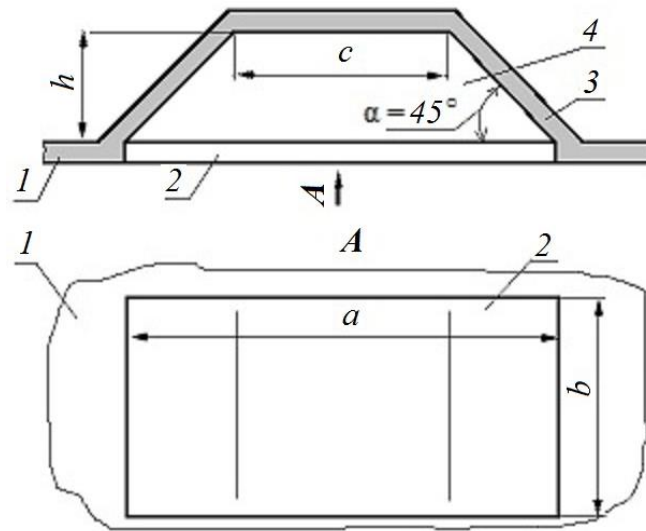
Клапанные тарелки, применяемые в аппаратах для процессов взаимодействия газа (пара) и жидкости, представлены двумя разновидностями: с подвижными клапанами и со стационарными клапанами. Производство и использование тарелок со стационарными клапанами осуществляется несколько последних десятилетий [1 – 3]. По сравнению с тарелками с подвижными клапанами они проще, дешевле, менее материалоемки, малочувствительны к загрязнениям. Информация о гидродинамических характеристиках данных тарелок, например, гидравлическом сопротивлении, в открытых источниках не представлена. Вследствие этого нами проводятся экспериментальные исследования гидродинамических характеристик тарелок со стационарными клапанами, которые необходимы для проектирования аппаратов с данными контактными устройствами.

На первом этапе исследований проводились опыты по определению гидравлического сопротивления сухих тарелок. Объектами этих исследований являлись тарелки с клапанами прямоугольной формы длиной $a = 20$ мм и шириной $b = 10$ мм (см. рис. 1). Высота бокового отверстия под клапаном для выхода газа составляла $h = 5$ мм, а длина основания клапана $c = 10$ мм. Диаметр экспериментальных тарелок равнялся $0,240$ м, они были изготовлены с различным числом клапанов и их взаимным расположением. Для первого образца тарелки относительное свободное сечение $f_{св}$ составляло $0,209$ м²/м², для второго – $0,106$ м²/м², а для третьего – $0,053$ м²/м².

Экспериментальная установка для исследования гидродинамических характеристик массообменных тарелок имела производительность по воздуху до 400 м³/ч, что позволяло достигать скорости газа в расчете на полное сечение тарелки w до $2,45$ м/с. В таком случае скорость воздуха в отверстиях тарелки w_0 при проведении опытов изменялась: для первого образца тарелки от $5,5$ до $11,9$ м/с; для второго – от $6,0$ до $23,0$ м/с; для третьего – от $12,0$ до $46,0$ м/с.

При проведении опытов фиксировали объемный расход воздуха через экспериментальную колонку Q_y , температуру воздуха t , барометрическое давление $P_б$ и гидравлическое сопротивление тарелки ΔP_c .

Погрешности измерений составляли: Q_y – до 5 %; t – до 0,2°C; P_6 – до 1 кПа; ΔP_c – до 10 Па. Каждый из опытов дублировался.



1 – основание тарелки; 2 – отверстие под клапан в основании тарелки;
3 – клапан; 4 – боковое отверстие под клапаном для выхода газа

Рисунок 1 – Схема клапана экспериментальных тарелок

При обработке опытных данных по исследованиям сухих тарелок получены графические зависимости гидравлического сопротивления их ΔP_c от скорости газа в расчете на полное сечение тарелок w . В качестве результирующего параметра, характеризующего гидравлическое сопротивление сухой тарелки, по формуле Дарси рассчитывали ее коэффициент сопротивления ξ :

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho w_o^2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Скорость воздуха в отверстиях тарелки рассчитывалась:

$$w_o = \frac{w}{f_{cs}}. \quad (2)$$

Результаты экспериментальных исследований сухих тарелок со стационарными клапанами представлены на рис. 2 в виде графических зависимостей коэффициента сопротивления сухой тарелки ξ при различных ее исполнениях от скорости воздуха в расчете на полное сечение этих тарелок w .

Анализ результатов опытов показал, что зависимости $\Delta P = f(w)$ можно приближенно описать как квадратичные параболы. Полученные результаты согласуются с теорией, описывающей гидравлическое сопротивление сухих массообменных тарелок [4].

Графики на рисунке 2 показывают тенденцию некоторого снижения коэффициента сопротивления сухой тарелки ζ при увеличении скорости газа.

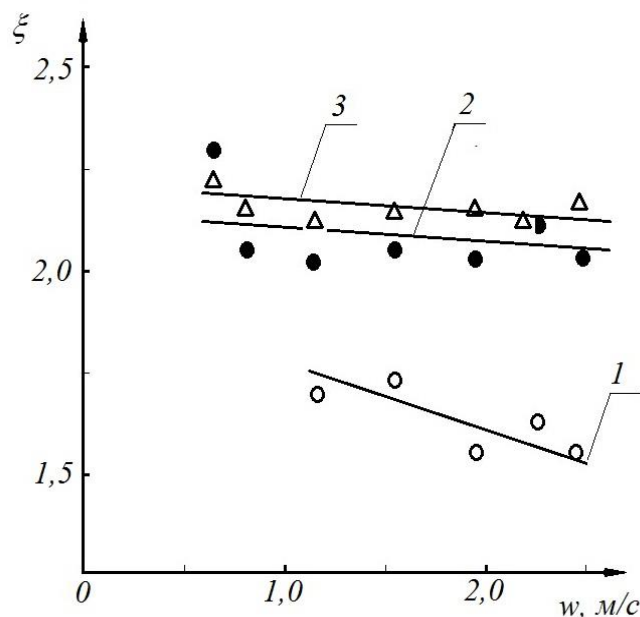


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента ζ от скорости воздуха w :
1 – при $f_{св} = 0,209 \text{ м}^2/\text{м}^2$; 2 – при $f_{св} = 0,106 \text{ м}^2/\text{м}^2$; 3 – при $f_{св} = 0,053 \text{ м}^2/\text{м}^2$

Также отмечено чувствительное уменьшение ζ при увеличении относительного свободного сечения отверстий для прохода газа $f_{св}$. Указанное явление отмечается в литературе и для других типов тарелок, в частности, ситчатых [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Клапанные тарелки EDV [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.bts.net.ua/column/edv. – Дата доступа: 12.02.2020.
2. Колонное оборудование [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.ingehim.ru/files/colonnoe --oborudovanie.pdf](http://www.ingehim.ru/files/colonnoe--oborudovanie.pdf). – Дата доступа: 14.02.2020.
3. Тарелки для переноса массы [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.rubbersealing.com/trays-Ru.html. – Дата доступа: 12.02.2020.
4. Рамм, В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

Н. П. Саевич, доц., канд. техн. наук;
Д. Г. Калишук, доц., канд. техн. наук;
Ы. А. Усманов, магистрант; Ж. Р. Ниезов, магистрант;
И. С. Рахматуллаев, магистрант (БГТУ, г. Минск)

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТАКТНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Контактные теплообменники достаточно широко применяются в химической, горноперерабатывающей и пищевой промышленности, в сельском хозяйстве для нагрева острым паром чистых жидкостей, а также растворов, суспензий и т. д.

Нагрев жидких сред острым паром имеет следующие преимущества по сравнению с их нагревом глухим паром: отсутствует термическое сопротивление стенки, разделяющей теплоносители; движение и конденсация паровых пузырей в жидкости вызывает ее дополнительное перемешивание и активную турбулизацию, что интенсифицирует теплопередачу; процесс эксплуатации оборудования более стабилен во времени, т. к. требуется меньше остановок аппаратуры на ее очистку.

В большинстве случаев при нагреве острым паром используются контактные подогреватели жидких сред барботажного и струйного типов. Струйные теплообменники-подогреватели по сравнению с барботажными компактны и легко встраиваются в технологическое оборудование (реакторы, растворители и т. д.) и трубопроводы. Однако установка и эксплуатация их внутри емкостных или колонных аппаратов во многих случаях нежелательна из-за динамических воздействий высокоскоростной струи пара на элементы конструкции, а также из-за негативных эффектов, сопряженных с явлением кавитации, возникающем при конденсацией острого пара в нагреваемой жидкой среде. При указанных обстоятельствах применим вариант использования вынесенного контактного теплообменника с вводом струи пара в жидкость. Он не требует установки насоса для организации циркуляции жидкости и, следовательно, дополнительного расхода энергии на его привод. В учебной и в фундаментальной научной литературе [1-4] информация по расчетам, конструированию и режимах работы подобных струйных контактных теплообменников смешения отсутствует.

Авторами был разработан образец циркуляционного контактного подогревателя, а также экспериментальная установка для его исследований [5]. Установка включает емкость (аппарат), соединенную циркуляционными трубами (холодной и горячей) с корпусом теплообмен-

ного аппарата. Внутри корпуса теплообменника устанавливалось эжекционное устройство через которое в жидкость подавался острый пар. Эжекционный эффект в зоне взаимодействия фаз обеспечивал при работе аппарата активную направленную циркуляцию жидкости по замкнутому контуру «емкость – холодная труба – корпус теплообменного аппарата – горячая труба – емкость».

В ходе эксперимента определялась динамика изменения температуры среды в различных точках установки и теплообменника. Также проводилась видеосъемка зоны взаимодействия пара с жидкостью и картины течения трассера в холодной циркуляционной трубе при измерении скорости циркуляции. Визуальными наблюдениями оценивался характер взаимодействия пара и жидкости в аппарате.

При выполнении опытов поддерживалось избыточное давление пара на входе в сопло от 15 до 40 кПа. При этом скорость истечения пара составляла от 20 до 125 м/с.

В ходе обработки опытных данных определялись: количество тепла на нагрев жидкости; скорость циркуляции жидкости в холодной трубе; скорость пара на выходе из сопла (скорость истечения); удельный объемный теплосъем и объемный коэффициент теплопередачи.

На рис. 1 представлена зависимость объемного коэффициента теплопередачи K_v , кВт/(м³·град), от скорости истечения острого пара w_D , м/с, для различных вариантов исполнения узла ввода острого пара (с эжектором и без него).

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

- эффективность работы теплообменника зависит от скорости истечения острого пара в нагреваемую жидкость;
- интенсивность теплообмена скачкообразно возрастает при скоростях истечения пара из сопла 65–80 м/с;
- при скорости истечения пара более 80 м/с достижимы объемные коэффициенты теплопередачи свыше 70 кВт/(м³·град), при этом удельный теплосъем может превышать значений 2 МВт/м³.

Исследованный контактный подогреватель имеет простую конструкцию, легко встраивается в существующие емкостные или колонные аппараты и не требует установки насоса. Выносная конструкция теплообменника позволяет исключить влияние динамических воздействий высокоскоростной струи острого пара на элементы конструкции основного аппарата, а также минимизировать негативное влияние кавитационных эффектов.

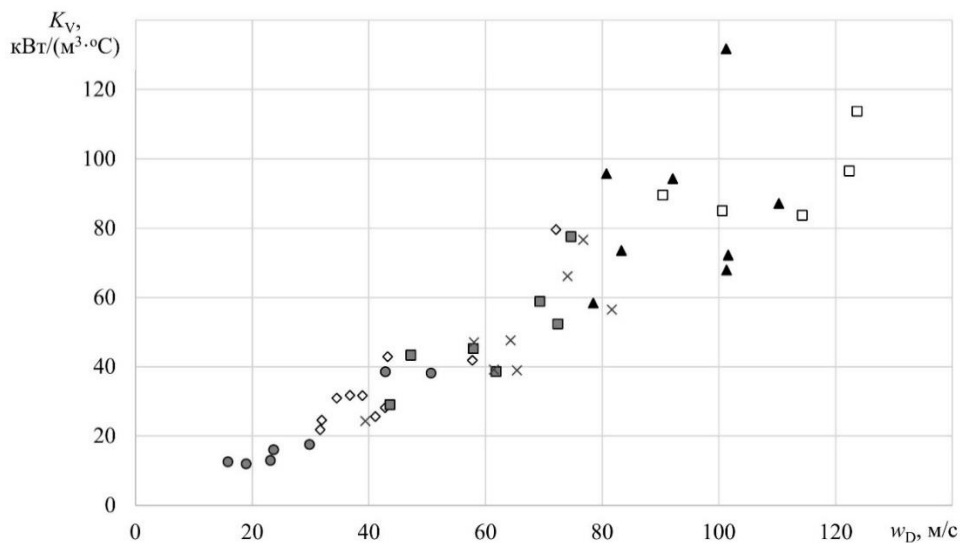


Рисунок 1 – Зависимость объемного коэффициента теплопередачи K_v от скорости истечения острого пара w_D

Скорость циркуляции нагреваемой жидкости в циркуляционных трубах, при избыточном давлении греющего пара на входе в сопло 30–40 кПа составляла от 0,3 до 0,6 м/с. Это позволяет сделать вывод о применимости исследованного контактного выносного теплообменника для нагревания жидкости с включениями в виде твердых частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Контактные теплообменники / Е. И. Таубман [и др.]. – М.: Химия, 1987. – 256 с.
2. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Зингер Н. М. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
3. Цегельский, В. Г. Двухфазные струйные аппараты / В. Г. Цегельский. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 408 с.
4. Соснин, Ю. П. Контактные водонагреватели / Ю. П. Соснин. – М.: Стройиздат, 1974. – 359 с.
5. Саевич, Н. П. Теплообмен и гидродинамика в струйном циркуляционном контактом теплообменнике-подогревателе / Н. П. Саевич [и др.] / В сб. НЕФТЕХИМИЯ– 2020: материалы III Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазоперераб., Минск, 2–3 декабря 2020 г. – Минск: БГТУ, 2020. – с. 219 – 223

УДК 664.02

Л. Ш. Тошатов, И. Б. Назарханов, магистранты (Республика Узбекистан);
А. Э. Левданский, зав. кафедрой, д-р техн. наук;
Е. В. Опимах, ст. преп., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ НА ЗАТОПЛЕННОМ ОТВЕРСТИИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО АЭРАТОРА

В связи с активным применением процесса флотации, он постоянно совершенствуется. Одно из основных направлений совершенствования данного процесса – это улучшение аэрационных характеристик аппаратов.

Точное решение, описывающее стадии роста пузырька, в настоящее время не получено из-за многочисленных факторов, которые аналитически и экспериментально не определимы. Предложено несколько вариантов описания аэрации [1]. Один из них подразумевает использование дифференциальных уравнений движения жидкости у поверхности растущего пузырька (Навье – Стокса, Бернулли, уравнения непрерывности), а также термодинамических уравнений равновесия. Эти уравнения решают численными методами (например, методом конечных элементов). Такое моделирование процессов становится одним из наиболее распространенных методов исследования объектов и явлений различной природы. Оно позволяет экономить огромные средства, а также предсказывать параметры различных процессов.

Была поставлена задача построения модели, сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными.

Сама модель создавалась в приложении Design Modeller и рассчитывалась с помощью программы Ansys Fluent. Варьируемые параметры выбраны следующие: диаметры отверстия – 0,5 мм, 1 мм, 1,5 мм; скорости аэрации – 0,01 м/с, 0,05 м/с, 0,1 м/с.

Построена регулярная сетка с размером элемента 10^{-6} м. Выбран метод расчета Phases Coupled Simple. При запуске расчетов устанавливали величину временного шага 0,001 секунды и количество шагов 10000. Максимальное число итераций 20 за один временной шаг. Пример результатов моделирования на 3000 шаге для модели с диаметром отверстия 0,5 мм с различной скоростью газа в отверстии представлены на рисунке 1.

По результатам моделирования отслеживалась траектория движения пузырьков с течением времени, благодаря масштабной шкале определялись их относительные скорости движения в жидкости и размер.

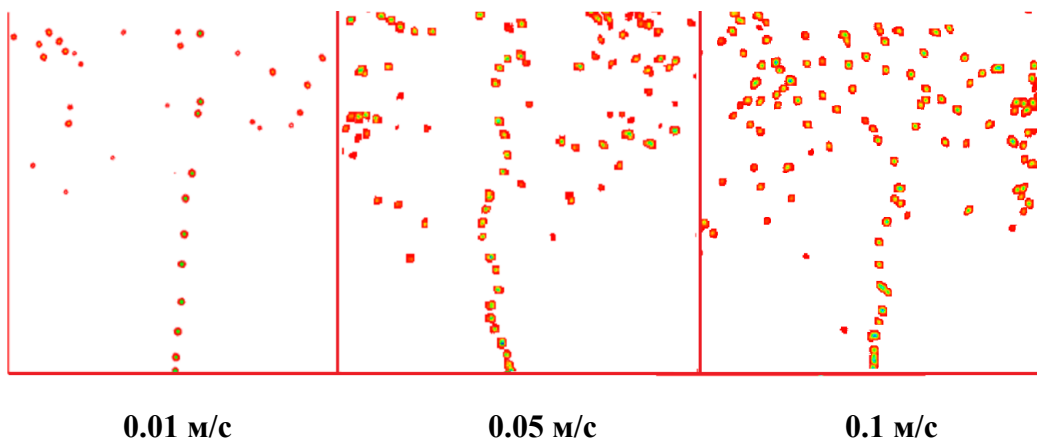


Рисунок 1 – Пример результатов моделирования для модели с диаметром отверстия 0,5 мм с различной скоростью газа в отверстии

Результаты моделирования сопоставлялись с экспериментальными исследованиями (рисунок 2).

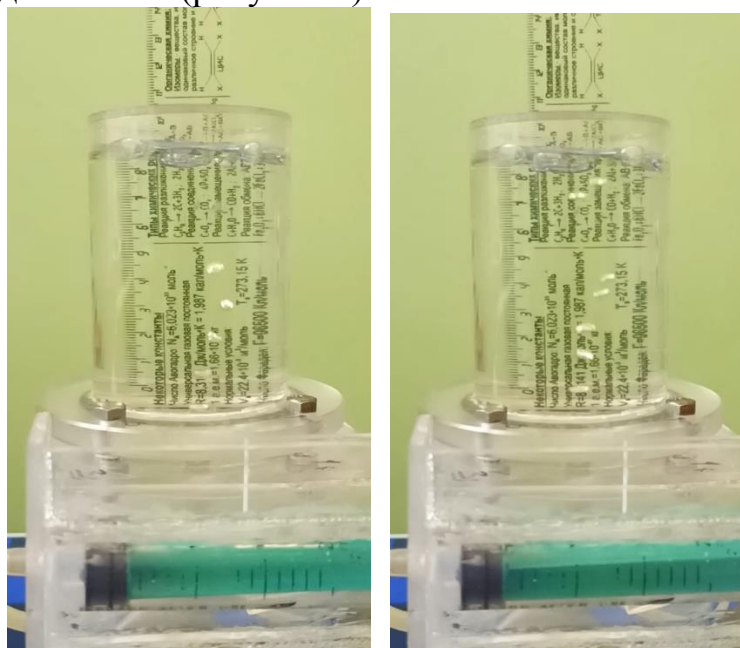


Рисунок 2 – Экспериментальные исследования скорости пузырьков воздуха в воде в зависимости от их диаметра

Съемка производилась с частотой 960 кадров в секунду. Объемный расход газа рассчитывался по перемещению поршня, а по диаметру отверстия рассчитывалась средняя скорость воздуха в отверстии. Скорость движения пузырьков оценивалась по масштабной линейке. При этом учитывалось искажение размеров за счет цилиндрической формы емкости. Сопоставление результатов моделирования, а именно относительных скоростей пузырьков воздуха в воде, осуществлялось с экспериментальными данными [2, 3] показанными на рисунке 3.

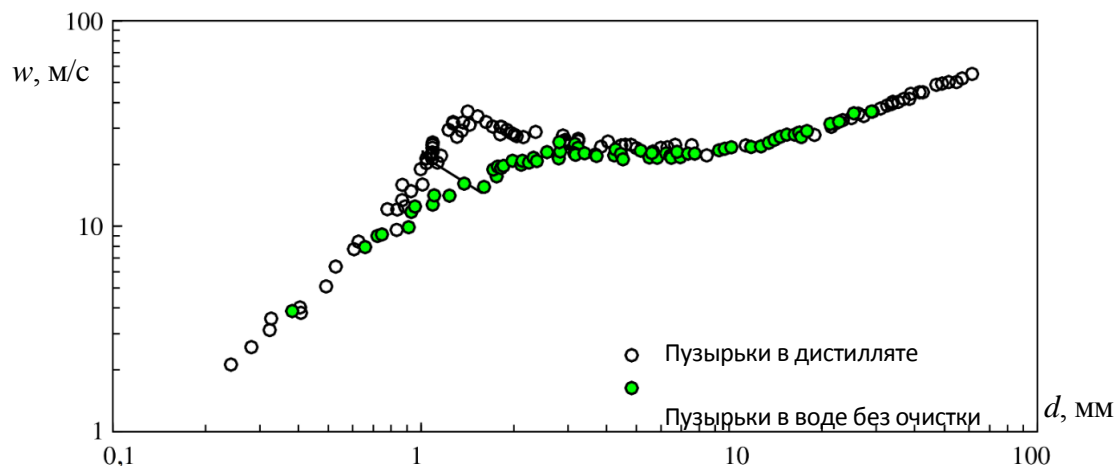


Рисунок 3 – Относительные скорости (м/с) пузырьков воздуха в воде в зависимости от их диаметра (мм)

Экспериментальные данные содержат результаты как для пузырьков в дистиллированной воде, так и для случая с водой без предварительной очистки. Поскольку процесс флотации осуществляют с примесями в рабочей жидкости, то для сопоставления результатов моделирования выбрали соответствующие экспериментальные данные.

В результате сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными для случая пузырьков воздуха в воде без предварительной очистки, в расчетную модель вносились корректировки и достигалось минимальное отклонение результатов.

В результате выполнения данной работы получена и оптимизирована модель процесса аэрации рабочего объема флотационного аппарата. При анализе результатов выявлены влияния диаметра отверстия аэратора и скорости газа на равномерность процесса аэрации рабочего объема флотационного аппарата. Полученная модель позволит оптимизировать конструкцию аэратора для повышения эффективности процесса флотации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поверхностно-активные вещества: справочник / А. А. Абрамзон [и др.]; под ред. А. А. Абрамзона, Г. М. Гаевого. – Л.: Химия, 1979. – 376 с.
2. Clift, R. Bubbles, drops, and particles / R. Clift, J. R. Grace, M. E. Weber. – New York : Academic Press. 1978. – XIII, 380 p.
3. Loth, E. Quasi-steady shape and drag of deformable bubbles and drops / E. Loth // Intern. J. of Multiphase Flow. – 2008. – Vol. 34, № 6. – P. 523–546.

УДК 664.02

И. Б. Назарханов, Л. Ш. Тошатов, магистранты (Республика Узбекистан);
А. Э. Левданский, зав. кафедрой, д-р техн. наук;
Е. В. Опимах, ст. преп., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО АЭРАТОРА

Равномерная аэрация жидкости представляет собой сложную задачу. Одним из возможных путей исследования этого явления является применение современных методов вычислительной гидродинамики.

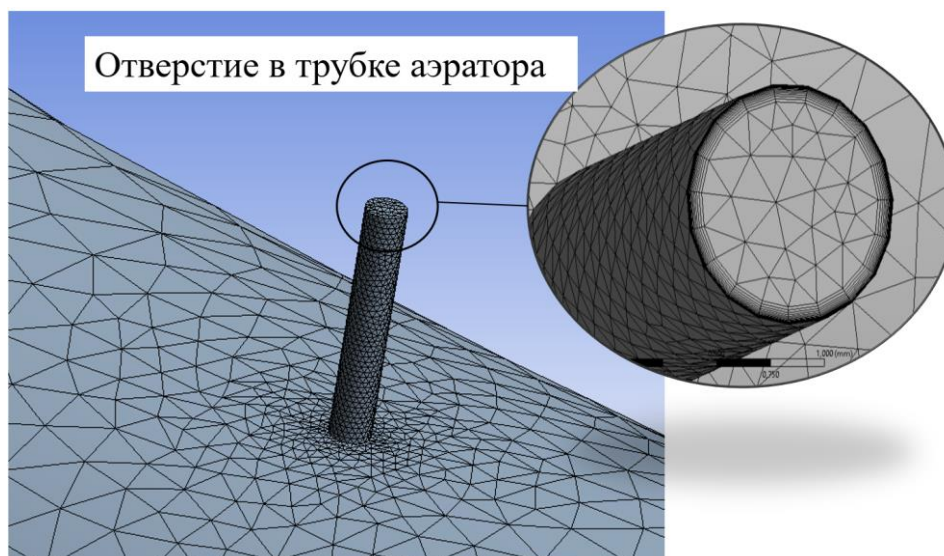
Ранее авторами была разработана методика инженерного расчета конструкции пневматического аэратора, представляющего собой перфорированную трубку, изогнутую в виде спирали Архимеда в горизонтальной плоскости. Однако методика инженерного расчета не учитывала влияния диаметра трубки аэратора и расхода воздуха на равномерность аэрации. Поэтому цель работы заключалась в моделировании течения потока воздуха в аэраторе для определения оптимального диаметра трубки аэратора и расхода воздуха при которых равномерность аэрации будет достаточной, а затраты на эксплуатацию будут минимальны.

Была построена трехмерная модель аэратора. В принимаемой модели основные параметры (шаг спирали, длина трубки аэратора, количество отверстий аэратора) оставались постоянными, а внутренний диаметр трубки и расход воздуха изменялись в зависимости от опыта.

В качестве расчетной области была выделена внутренняя полость аэратора и отверстий, в которых движется поток газа. Для численного решения расчетная область была разделена локально-сгущающейся адаптивной тетраэдральной сеткой показанной на рисунке 1. В результате численного моделирования были проанализированы профили распределения скорости газа и поле давления по объему аэратора при различных конструктивных и технологических параметрах агрегата. Для всех вариантов исследования были получены данные распределения локальных скоростей газового потока по диаметру выходного отверстия аэратора для различных отверстий по длине трубки аэратора.

Для каждого отверстия была рассчитана средняя скорость выходящего газового потока. Оценку качества аэрации производили по величине коэффициента вариации средних скоростей газовых потоков на выходе из отверстий по длине трубки аэратора.

Представлены графики изменения средней скорости в выходных отверстиях аэратора по его длине, для различных диаметров трубки аэратора при одинаковом объёмном расходе газа.



Отверстие в трубке аэратора

Рисунок 1 – Фрагмент полученной сетки

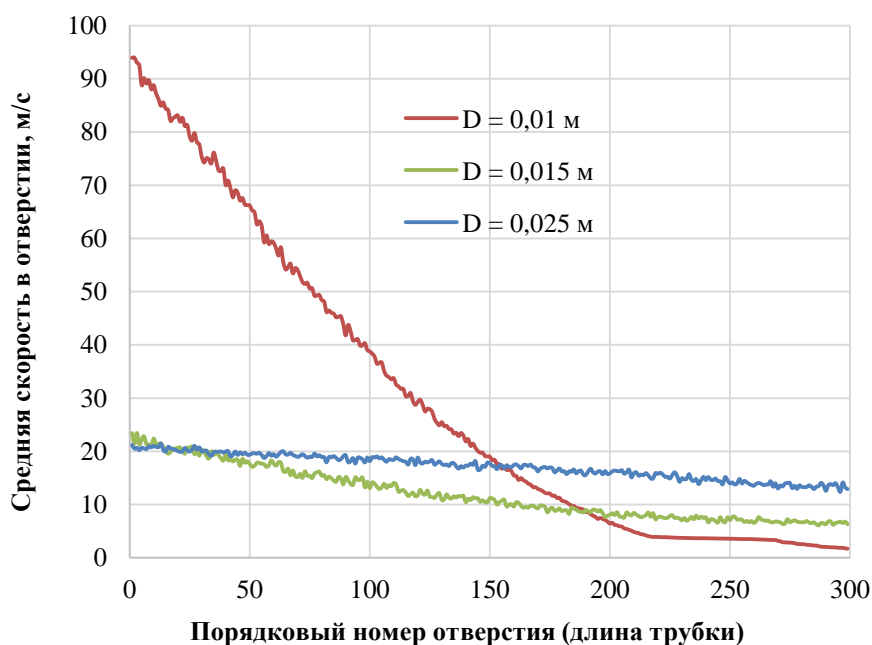


Рисунок 2 – График зависимости средней скорости в выходных отверстиях аэратора по его длине, для различных диаметров трубки аэратора при одинаковом объёмном расходе газа

Получены зависимости стандартного отклонения средних скоростей газа на выходе из отверстий аэратора от массового расхода воздуха для различных диаметров трубки аэратора (рисунок 3). Так же были построены зависимости стандартного отклонения средних скоростей воздуха на выходе из отверстий аэратора от диаметра трубки аэратора при различных массовых объёмных расходах газа (рисунок 4).

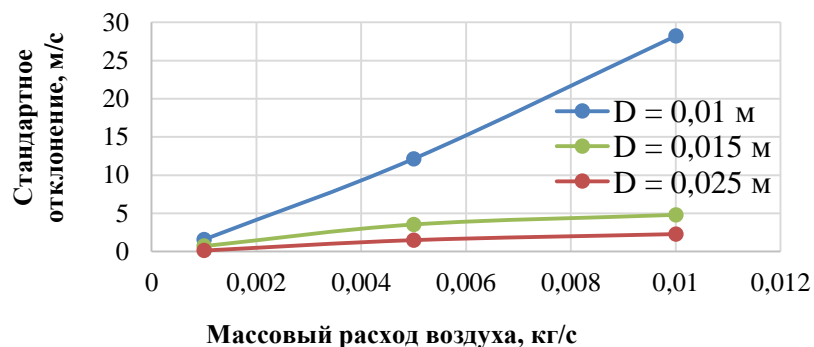


Рисунок 3 – Результаты моделирования

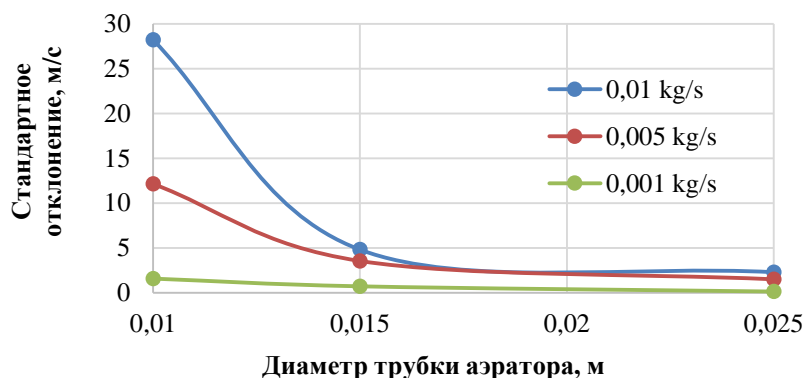


Рисунок 4 – Результаты моделирования

Увеличение диаметра трубки аэратора приводит к сглаживанию средних скоростей газовых потоков в выходных отверстиях по длине трубки аэратора и к уменьшению коэффициента вариации средних скоростей воздуха на выходе из отверстий аэратора. То есть происходит более равномерная аэрация рабочей жидкости. Это может быть связано с уменьшением потерь давления потока и его выравниванию по длине трубки аэратора. Добиться равномерной аэрации также можно путем уменьшения расхода газа, подаваемого в аэратор. Для трубок большего диаметра влияние расхода газа незначительно.

В результате выполнения данной работы, на основе современного, высокоэффективного и экономичного метода моделирования, показана возможность оптимизации конструктивных и режимных параметров пневматического аэратора. При анализе результатов, полученных при выполнении работы, выявлены влияния диаметра трубки аэратора и массового расхода газа на равномерность процесса аэрации рабочего объёма флотационного аппарата. Предложены зависимости, с помощью которых можно произвести выбор оптимальных конструктивных и технологических параметров пневматического аэратора при изготовлении и эксплуатации флотационного аппарата.

А. А. Ковалева, магистрант; Е. Г. Федарович, студ.;
А. Э. Левданский, доц., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Важной проблемой, имеющей большое экологическое и экономическое значение для многих развитых стран, является переработка резиновых отходов, в частности отработанных шин и резинотехнических изделий.

Наиболее экологически безопасным методом переработки резинотехнических отходов является пиролиз, поскольку процесс протекает в отсутствии атмосферного воздуха и содержание токсичных соединений в пиролизном газе незначительно.

Пиролиз резинотехнических отходов, в том числе изношенных автопокрышек, сопровождается образованием газовой, жидкой и твердой фракции [1]. Газовая фаза обычно состоит из смеси водорода, метана, окиси и двуокиси углерода и низкомолекулярных углеводородов. В жидкой фазе содержатся преимущественно ненасыщенные алифатические и ароматические соединения, твердый остаток пиролиза содержит наполнители, окись цинка, углерод.

Наибольшее внимание из продуктов пиролиза, пригодных к использованию, вызывает технический углерод. В соответствии с ГОСТ 7885, технический углерод, полученный методом пиролиза, представляет собой крошку черного, с сероватым оттенком, цвета, с пористой структурой и дисперсностью 0,2–1 см [2].

Решение вопросов о дополнительной переработке твердого углеродистого остатка после пиролиза автомобильных шин актуальна. Например, в работе Минхайдарова А.А. и соавторов показана возможность применения твердых остатков пиролиза изношенных шин в качестве сорбентов для адсорбции паров органических растворителей из воздушной среды, низкомолекулярных органических кислот из водных растворов и в качестве сорбентов разлитой на поверхности воды нефти [3].

Целью работы являлось изучения химического состава, а также условий обработки твердого углеродного остатка, полученного на установке низкотемпературного пиролиза ООО «РТСгрупп».

Определение химического состава твердого углеродного остатка, а также определение микроструктуры и изучение кристаллической структуры проводилось при помощи метода просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе, оснащенном системой химического микроанализа при 100-кратном увеличении рис. 1.

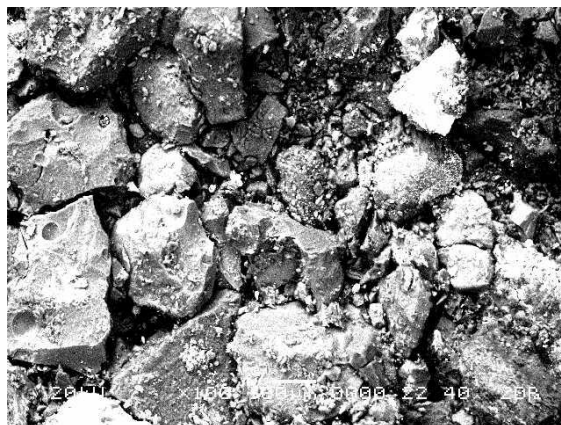


Рисунок 1 – Электронно-микроскопический снимок поверхности продукта пиролиза резинотехнических изделий

На рисунке 1 видно наличие крупных и мелких частиц неправильной формы, что говорит о неоднородности структуры материала. Также, на крупных частицах отчетливо видны поры с размером от 10 до 50 мкм.

По результатам анализа был определен химический состав материала (таблица).

Таблица – Химический состав твердого углеродного остатка, мас. %

C	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	CuO	ZnO
41,37	2,07	13,56	6,97	0,89	0,32	2,68	0,62	7,58	3,18	20,75

Анализируя полученные результаты определения химического состава, можно сделать вывод, что твердый углеродный остаток представляет собой сложную многокомпонентную структуру, основным компонентом которой является углерод. Присутствие в составе таких оксидов как Al₂O₃, SiO₂, CaO, K₂O объясняется присутствием в резиновых изделиях разного рода наполнителей, в качестве которых используют мел и каолин. Содержание FeO объясняется наличием металлокорда. Наличие в больших количествах ZnO, а также некоторого количества CuO и TiO₂ связано с введением в состав резины активаторов, которые вводятся для уменьшения длительности вулканизации и увеличения прочности изделий. Помимо выше указанных компонентов, в состав резины вводятся вулканизирующие вещества, которые состоят преимущественно из серы, что объясняет наличие в твердом углеродном остатке серного ангидрида.

Для исследования процессов, происходящих в твердом углеродном остатке при непрерывном нагревании, использовалась дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК). При проведении анализа испытуемый образец твердого углеродного остатка постепенно нагре-

вался до температуры 1000 °С в инертной среде, при этом регистрировалось изменение температуры.

На рисунке 2 представлена кривая термического анализа.

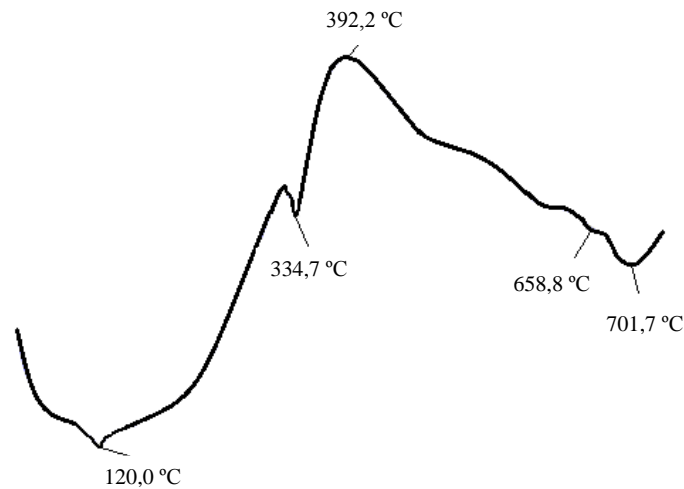


Рисунок 2 – Дифференциальная кривая нагрева продукта пиролиза

На кривой ДТА присутствуют: эндотермический эффект при температуре 120 °С связан с удалением физически связанной влаги в материале; эндотермический эффект при температуре 334,7 °С предположительно связан с восстановлением оксида железа водородом и коксом; экзотермический эффект при температуре 392,2 °С связан с выгоранием органической составляющей; эндотермические эффекты при температурах 658,8 °С и 701,7 °С связаны с разложением карбонатов, которые вводятся в резиновую смесь для роста ее объема и уменьшения содержания каучука.

ЛИТЕРАТУРА

1 Tang Daowen, Li Junqi, Chu Yonghao, Wu Fuzhong, Zhao Pinguoan Исследование процесса пиролиза отходов полимеров и их утилизации Guizhou gongye daxue. Ziran kexue ban // J. Guizhou Univ. Technol. Natur. Sci. Ed. – 2004. – V. 33. – № 6. – P. 83 – 85, 102.

2 Булавин А.В., Пашкевич В.П. Переработка отработанных автомобильных шин методом низкотемпературного пиролиза // Матеріали конференції «Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів. – Донецьк : ДНТУ, 2004. – С. 91–94.

3 RU 2248881 В, 27.03.2005.

УДК 622.767

С. В. Ярмолик, ст. преп.; А. А. Ковалева, магистрант;
Е. Г. Федарович, студ.; А. Э. Левданский, доц., д-р техн. наук;
Ф. А. Абдуназаров, магистрант; С. А. угли Кенгбоев, магистрант
(БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ОТХОДОВ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ГРАВИТАЦИОННО-РОТОРНОМ ПНЕВМОКЛАССИФИКАТОРЕ

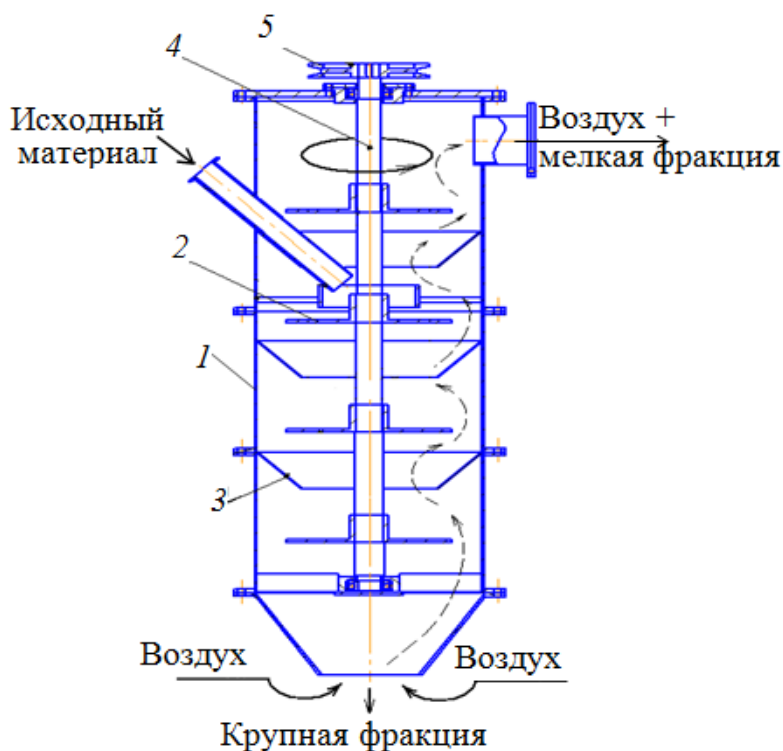
Несовершенство процессов измельчения часто не позволяет получить продукт с заданным дисперсным составом. В связи с чем, в технологический процесс приготовления сыпучих материалов устанавливают устройства для разделения материалов – классификаторы.

Классификация кусковых и сыпучих материалов может проводиться двумя способами: грохочением на перфорированной поверхности или в потоке среды (воздушной или водной). Наиболее эффективными являются сухие способы разделения в аппаратах с воздушными потоками [1, 2]. Гравитационные классификаторы по сравнению с другими типами воздушных классификаторов отличаются простотой конструкции и надежностью работы. Однако общим недостатком большинства разработанных конструкций является сравнительно невысокая эффективность разделения, что связано с неравномерностью распределения материала в рабочем объеме классификатора [1].

Классификацию твердых продуктов пиролиза резинотехнических изделий проводили с помощью роторно-гравитационного классификатора, схема которого представлена на рисунке 1. Отличительной особенностью конструкции, применяемого классификатора, является наличие вращающихся дисков, благодаря которым обеспечивается равномерное распределение материала в рабочем объеме классификатора.

Процесс классификации протекает следующим образом. Исходный материал через загрузочный патрубок подается на вращающийся диск классификатора. Под действием центробежной силы полидисперсный материал движется к периферии диска и равномерно распределяется в кольцевом зазоре между диском и корпусом классификатора. Далее под действием гравитационных сил частицы материала начинают двигаться вниз, попадают на пересыпной конус и опять направляются на нижележащий от конуса вращающийся

диск. Таким образом, исходный материал, двигаясь вниз, многократно пересыпается с дисков на конусы и наоборот. Навстречу падающим частицам движется создаваемый вентилятором поток воздуха, который многократно пронизывает падающий слой материала, откуда подхватывает и уносит с собой мелкие частицы. Крупные частицы, преодолевая силу воздушного сопротивления, опускаются вниз.



1 – корпус; 2 – диск; 3 – пересыпной конус; 4 – вал; 5 – приводной шкив

Рисунок 1 – Схема роторно-гравитационного классификатора

Для определения технологических характеристик классификатора были проведены серии экспериментов по исследованию влияния таких параметров, как частота вращения дисков и скорость воздушного потока по сечению классификатора, на процесс разделения. На рисунке 2 представлена зависимость изменение дисперсного состава крупной фракции при различной скорости воздуха.

На основании полученной зависимости изменения дисперсного состава крупной фракции при изменении скорости воздуха (рис. 2) можно сделать вывод, увеличение скорости воздуха приводит к вовлечению мелких частиц материала в крупную фракцию. В следствии ухудшается монофракционность состава, тем самым уменьшается эффективность классификации.

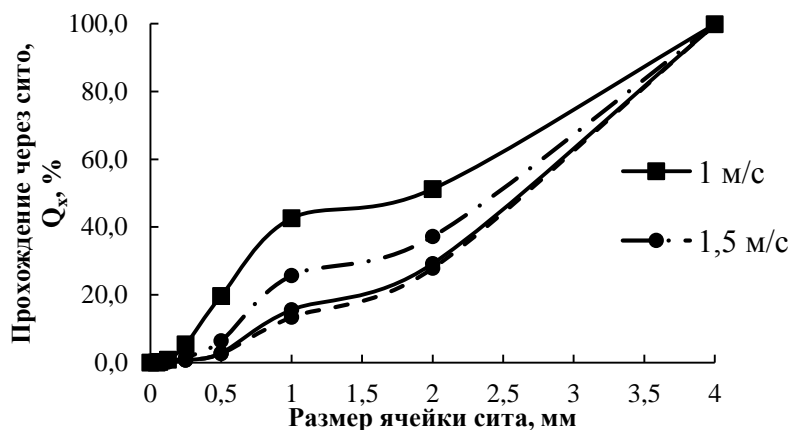


Рисунок 2 – Изменение дисперсного состава крупной фракции при изменении скорости воздуха

Изменение частоты вращения ротора незначительно влияет на дисперсность крупной фракции материала. Однако, ее увеличение способствует повышению эффективности разделения твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярмолик С.В. Экспериментальные исследования процесса разделения сыпучих материалов в роторно-гравитационном классификаторе / С.В. Ярмолик, Д.И. Чиркун, А.Э. Левданский, Э.И. Левданский // Труды БГТУ. № 3. Химия и технология неорганических веществ. – 2008. – С. 174–179.

2. Барский, М.Д. Гравитационная классификация зернистых материалов / М.Д. Барский, В. И. Ревнивцев, Ю. В. Соколкин. – М.: Недра, 1974. – 232 с.

УДК 622.734

А. А. Ковалева, магистрант; Е. Г. Федарович, студ.;
Ф. А. Абдуназаров, магистрант; С. А. угли Кенгбоев, магистрант;
А. Э. Левданский, доц., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ПОМОЛА ТВЕРДЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ОТХОДОВ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Исследования в области процессов помола различных материалов имеют актуальное значение, так как тонкость продуктов помола значительно влияет на их потребительские свойства. При этом следует

отметить, что помол и классификация мельчайших частиц наиболее проблематичны [1].

Для достижения требуемой тонины помола при производстве тонкоизмельченных продуктов из отходов используют обычно шаровые барабанные, вибрационные или планетарные мельницы. Однако шаровые мельницы весьма энергоемки, а вибрационные и планетарные вследствие сложности и большой металлоемкости – недолговечны и ненадежны в работе. Кроме того, измельченный материал в них засоряется продуктами износа шаров [2].

С точки зрения снижения энергоемкости представляют интерес центробежные мельницы. Поэтому исследование процесса тонкого измельчения в центробежной мельнице твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий является актуальной научной задачей.

В данной работе будет использована ударно-центробежная мельница с диаметром на концах разгонных лопаток равным 450 мм.

Проведение исследования включало изучение влияния следующих показателей на степень измельчения материала: изменение производительности; частоты вращения ротора; фракционного состава подаваемого материала. Определение степени измельчения твердого углеродного остатка проводилось при помощи ситового анализа с использованием сит с размерами ячейки, мм: 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063; 0,045.

Для отображения гранулометрического состава полученного при измельчении порошка, были построены гистограммы частного остатка от среднего размера частиц материала, при расходе 97,2 кг/ч (рис. 1).

На основе полученных данных, представленных на гистограмме (рис. 1), можно сделать вывод о том, что полученный порошок, при различных частотах, состоит преимущественно из частиц со средним размером 0,09 мм. Также отчетливо наблюдается зависимость изменения количества частиц данного размера от частоты вращения мельницы. При 2950 об/мин их содержание составляет 59,50 %, при 2360 об/мин – 48,58 %, 1770 об/мин – 44,21 %, 1330 об/мин – 38,80 %. На рисунке 2 представлена графическая зависимость гранулометрического состава материала при изменении производительности мельницы подовая исходный материал фракции 2–4 мм.

Как видно из рисунка 2, увеличение производительности негативно влияет на степень измельчения материала, в особенности это проявляется при повышении ее до 875 кг/ч. Анализируя полученную зависимость, можно сделать вывод что увеличение производительности допустимо до некоторого оптимального значения, в малой степени влияющего на гранулометрический состав измельчаемого материала, в

данном случае, допустимым является увеличение производительности до 675 кг/ч.

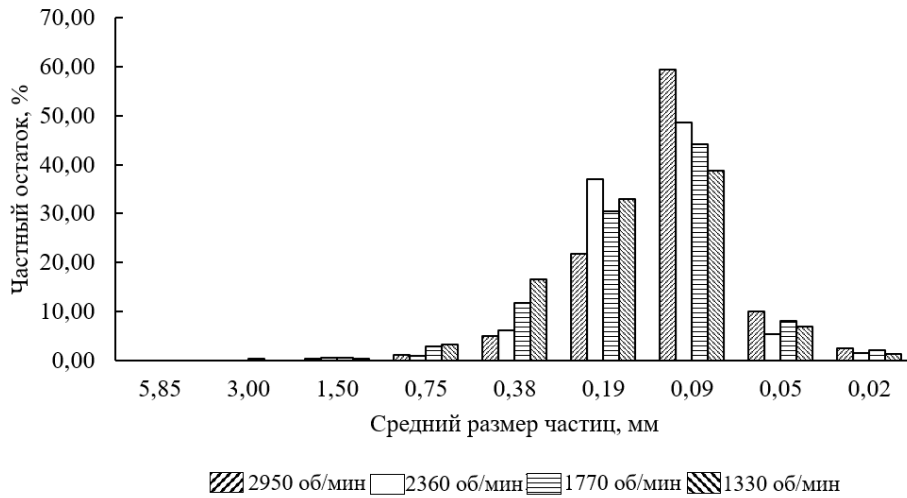


Рисунок 1 – Гистограмма частного остатка от среднего размера частиц материала

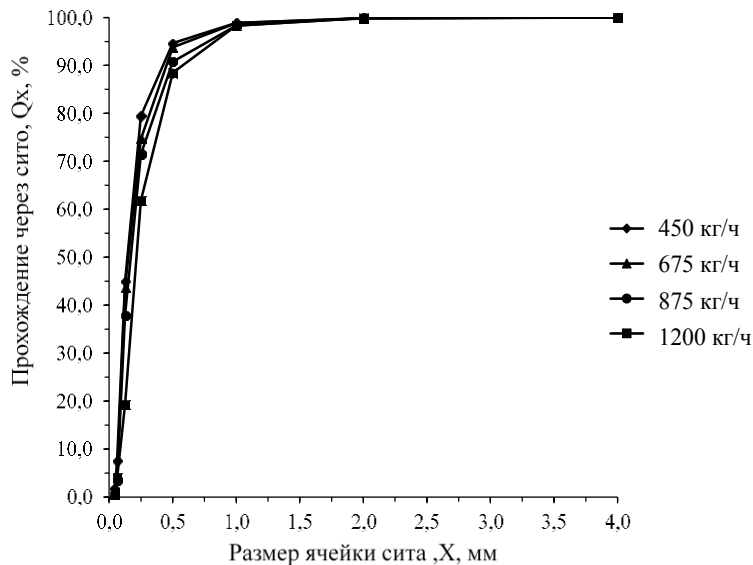


Рисунок 2 – Графическая зависимость гранулометрического состава материала при изменении производительности мельницы

В результате проведения экспериментальных исследований определения факторов, влияющих на степень измельчения материала при тонком измельчении в центробежно-ударной мельнице, было выявлено, что увеличение частоты вращения ротора является одним из решающих факторов, определяющих гранулометрический состав измельчаемого материала. Также, выявлено что увеличение производительности уменьшает степень измельчения материала, однако это изменение не значительно до некоторого оптимального значения, в данной работе

оно составило 675 кг/ч. Увеличение фракционного состава исходного материала от 2–4 мм до 4–7 мм не значительно влияет на степень измельчения материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов, В.С. Мельницы сверхтонкого измельчения / В.С. Богданов, Н.П. Несмеянов, Е.Ф. Катаев. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – 95 с.

2. Кряжев, Н.М. Определение рациональных параметров центробежной мельницы для тонкого измельчения карбонатных отходов [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.05.06) / Кряжев Николай Михайлович; Мос. гос. горн. ун-т. – М., 2004. – 24 с.

УДК 622.742

А. А. Ковалева, магистрант; Е. Г. Федарович, студ.;
А. Э. Левданский, доц., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ОТХОДОВ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В БАРАБАННОМ ГРОХОТЕ

Классификацией называется процесс разделения сыпучих материалов по крупности кусков или частиц.

Применяются следующие виды классификации:

- механическую (грохочение);
- пневматическую (сепарацию);
- гидравлическую.

В промышленности в основном применяют грохочение (разделение просеиванием через разделительную перегородку) и сепарацию (разделение за счет различных скоростей движения крупных и мелких частиц в воздушном потоке) [1].

Механическая классификация (грохочение) заключается в разделении материала просеиванием через разделительную перегородку. При механической классификации материал по крупности разделяется с помощью машин (грохотов), снабженных разделительными просеивающими элементами – ситами или решетками [2].

Целью работы являлось исследование процесса механической классификации твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий (РТИ).

Для классификации твердого продукта пиролиза РТИ было использовано грохочение с помощью барабанного грохота.

Барабанный грохот (рис.1) представляет собой установленный под наклоном барабан имеющий диаметр 500 мм с поверхностью из сетки с отверстиями диаметром 7,7 мм. Барабанный грохот включает в себя цилиндр с ячейками, расположенными по всей поверхности. Цилиндр размещается под углом и приводится в движение от электродвигателя. Материал поступает через воронку. Во время вращения барабана материал, находящийся во внутренней части барабана, под действием силы тяжести движется вдоль оси сепарирующей установки. Мелкофракционное сырье проваливается сквозь отверстия барабана, а сырье более крупных размеров перемещается в нижний отдел, где оно и изымается.

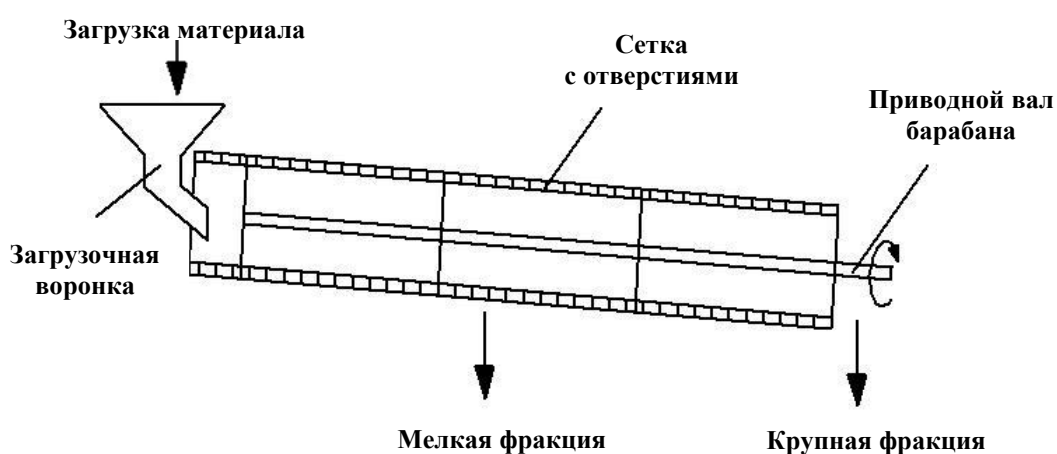


Рисунок 1 – Принципиальная схема барабанного грохота

Для определения факторов, влияющих на эффективность грохочения, были проведены экспериментальные исследования с изменением угла наклона и частоты вращения цилиндрической части грохота, а также с различной производительностью подаваемого материала. Далее для определения дисперсного состава крупной и мелкой фракции проводился ситовый анализ с использованием сит с размером отверстий, мм: 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063, 0,045.

На рис. 2 представлены интегральные кривые зернового состава мелкой фракции при различных частотах вращения барабана, расположенного под углом 10,5°.

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что увеличение частоты вращения грохота до 31 об/мин способствует увеличению степени дисперсности подрешетного продукта, однако при увеличении частоты до 42 об/мин данная зависимость является маловыраженной. Данное явление объясняется переходом движения частиц в водопадный режим, в результате которого помимо классификации также происхо-

дит измельчение (за счет удара частиц) и продавливание материала через отверстия барабана за счет более крупных частиц. Увеличение частоты вращения барабана до 42 об/мин способствует переходу движения частиц в сверхкритический режим, при котором все слои материала постепенно вступают в центрифугирование.

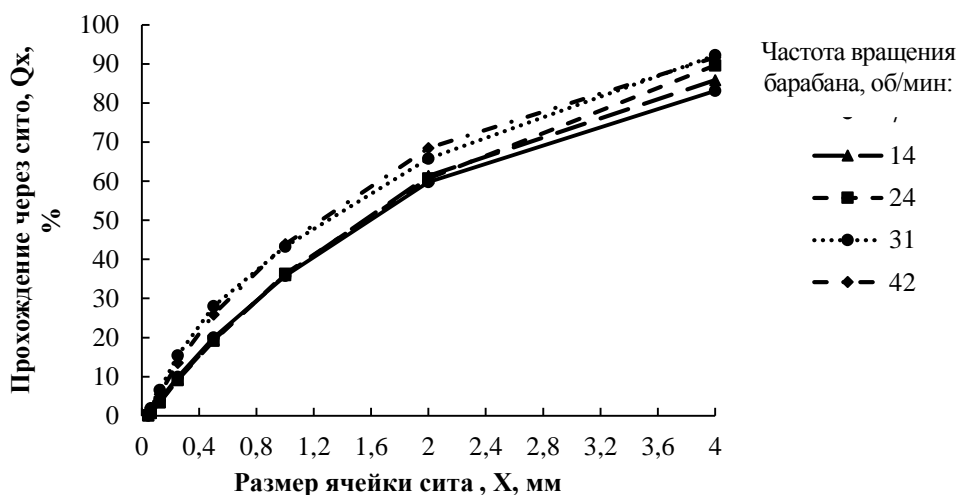


Рисунок 2 – Интегральные кривые зернового состава крупной фракции при различных частотах вращения барабана

В результате анализа экспериментальных данных было выявлено, что уменьшение угла наклона барабана до $7,5^\circ$ способствует увеличению эффективности грохочения. При увеличении частоты вращения грохота выше 24 об/мин в надрешетном материале наблюдалось присутствие частиц мелкой фракции. Это говорит о том, что дальнейшее увеличение скорости вращения барабана будет способствовать уменьшению эффективности грохочения за счет неполной классификации материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев, Ю.И. Конструирование и расчет машин химических производств / Ю.И. Гусев, И.Н. Карасев и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.
2. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие / В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев, М.А. Промтов, А.С. Тимонин. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 208 с.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АППАРАТА УДАЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЛАГИ МЕХАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Удаление жидкости из влажного материала сопровождается нарушением связи ее с телом, на что затрачивается энергия. Существуют различные как по величине, так и по природе виды связи влаги с материалом: физико-механическая, физико-химическая и химически связанная влага [1].

1) Физико-механически связанная влага. Это влага, свободно удерживаемая на поверхности твердых частиц влажного материала за счет адгезии, а так же заполняющая крупные капилляры материала в результате смачивания. Это влага наименее прочно связана с материалом.

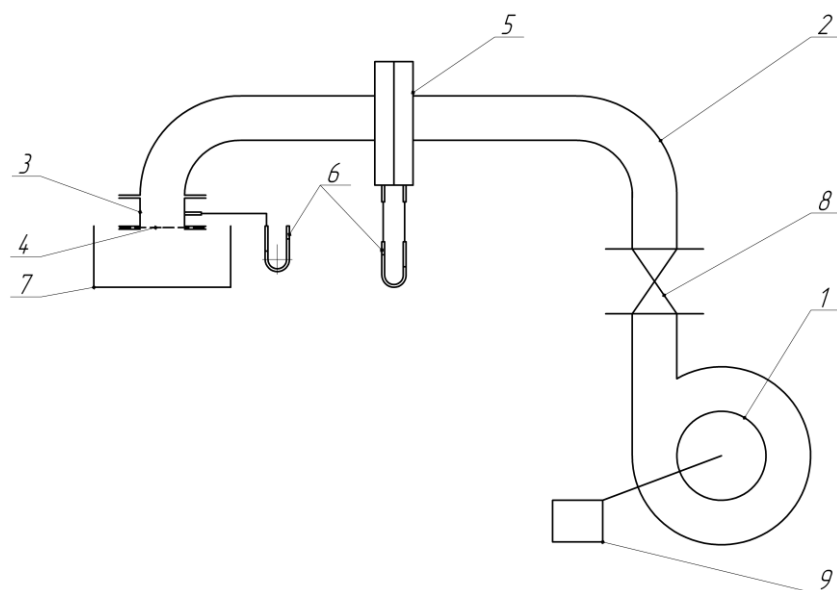
2) Физико-химически связанная влага. Прежде всего, это адсорбционно связанная влага, которая поглощается поверхностью мелких капилляров или на поверхности твердых влажных частиц образуется молекулярный слой адсорбированной влаги под действием молекулярного силового поля поверхностных молекул. Второй вид – осмотически связанная влага, которая проникает вследствие диффузии внутрь клеток материала. Физико-химически связанную влагу удалять из материала значительно трудней, чем физико-механически связанную.

3) Химически связанная влага. К этому виду относятся гидратная влага прочно связанная с веществом в виде гидроксильных ионов и вода молекулярных соединений типа кристаллогидратов. Химически связанная влага может быть удалена из материала в результате химического воздействия или прокаливания. Поэтому при обыкновенной сушке химически связанная влага не удаляется.

Многие продукты, производимые химической и смежными отраслями промышленности, проходят стадию сушки. Удаляемая на этой стадии влага часто является физико-механически связанной. Это минеральные удобрения (хлористый калий, сульфат аммония и др.), полимеры (полиэтилен, капролактамы, полистирол и т. д.). Основная масса влаги, которую удаляют при сушке минеральных удобрений, находится на поверхности кристаллов. Гранулы полимеров часто получают в виде водной суспензии, после чего от влаги избавляются на грохотах, центрифугах и последней стадией является сушка. В приведенных случаях влага находится на поверхности частиц.

Известны работы [2–4], где рассматриваются вопросы удаления влаги с поверхности материала не сушкой, а путем обдува частиц скоростным воздушным потоком, что позволяет значительно снизить расход энергии на процесс обезвоживания.

Для определения критической разности скоростей между фазами, обеспечивающей срыв влаги с поверхности частиц, была разработана экспериментальная установка (рисунок 1.).

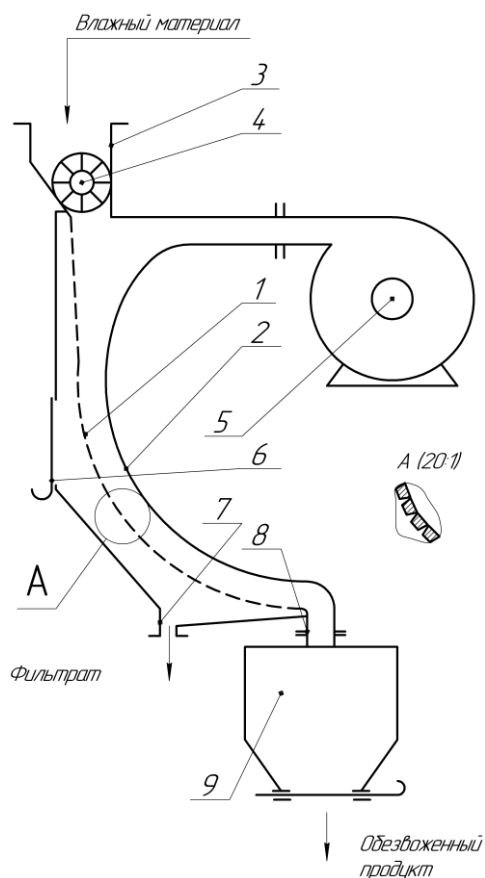


- 1 – вентилятор; трубопровод; 3 – патрубок;
 4 – фильтровальный (перфорированный) лист; 5 – диафрагма;
 6 – дифференциальный манометр; 7 – емкость;
 8 – вентиль; 9 – частотный преобразователь

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для определения критической скорости срыва влаги с поверхности частиц

Конструкция разработана на базе дугового грохота. В качестве фильтровального элемента используется часть неподвижного перфорированного цилиндра 1 с горизонтальной осью. Фильтровальный элемент помещен в металлический корпус 2. В верхней части корпуса имеется патрубок 3 с питателем 4 для подачи в аппарат влажного материала и сбоку в верхней части подсоединен вентилятор 5. На боковой стенке корпуса имеется шибер 6, позволяющий регулировать количество воздуха прошедшего через отверстия перфорированного элемента. В нижней части корпуса 2 имеется патрубок 7 для удаления жидкой фазы, а патрубок 8 служит для подсоединения емкости 9 для сбора обезвоженного материала.

Для глубокого обезвоживания материала можно использовать многокаскадные дуговые сита (рис. 3). Принцип работы их отличается от однокаскадного фильтра, представленного на рис. 2.



а) – принципиальная схема; б) – внешний вид экспериментальной установки;
 1 – фильтровальный элемент, 2 – металлический корпус, 3 – патрубок с питателем для подачи влажного материала, 4 – ячейковый питатель 5 – вентилятор, 6 – шибер, 7 – патрубок для отвода фильтрата, 8 – патрубок отвода обезвоженного материала, 9 – емкость для сбора обезвоженного материала

Рисунок 2 – Дуговой влагоотделитель

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Муштаев, В.М. Ульянов Сушка дисперсных материалов. М. «Химия» 1988 – 352 с. (стр. 11)
2. Кваша, В.Б. Срыв влаги с поверхности частиц в инжекторном слое / В.Б. Кваша, В.В. Чижов, В.Г. Айнштейн // Инженерно-технический журнал. – 1976. – № 3. – С. 411-415.
3. Сорока, Е.И. Разработка комбинированного способа сушки, основанного на дезагрегации дисперсных материалов и механическом уносе влаги с целью экономии топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Е.И. Сорока; ВНИИ металлург. теплотех. – Свердловск, 1990. – 25 с.
4. Филипов, В.А. Технология сушки и термоаэроклассификации углей / В.А. Филипов. – М.: Недра, 1980. – 287 с.

УДК 541.138.2

А.В. Поспелов, мл. науч. сотр. центра ФХМИ;
С.С. Ветохин, доц., канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск);
В.И. Романовский, ст. науч. сотр., канд. техн. наук
(ИОНХ НАН Беларуси, г. Минск)

КОРРОЗИЯ СТАЛИ МАРКИ Ст3 В ВОДНОМ РАСТВОРЕ ОЗОНА И В ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИХ РАСТВОРАХ

Коррозия металлов наносит огромный ущерб практически любой отрасли промышленности. Основной причиной, вызывающей коррозионное разрушение металлов и сплавов, является протекание на их поверхности электрохимических или химических реакций. В последний год одним из самых актуальных вопросов стала дезинфекция поверхностей. Рекомендуются ВОЗ дезинфицирующие вещества в большинстве своем содержат хлорсодержащие органические и неорганические вещества. В качестве альтернативы хлорсодержащим растворам ранее было предложено использовать растворы озона в воде [1, 2]. Данный подход характеризуется рядом положительных технических, экологических и экономических эффектов [3–5].

Цель данной работы – определение динамики изменения скорости коррозии, зависимости величины удельной потери массы от времени углеродистой стали марки Ст3 в хлорсодержащих дезинфицирующих растворах и в водном растворе озона.

Для определения коррозионной стойкости стали марки Ст3 использовались следующие реагенты: гипохлорит кальция, гипохлорит натрия, хлорамин Б, хлорная известь, водный раствор озона. Исследуемые концентрации используемых хлорсодержащих дезинфицирующих растворов: 2% активного хлора. Условия озонирования воды: концентрация озона в газовой смеси – 2,7 г/м³; расход газовой смеси – 13,2 л/мин; производительность по озону – 2,14 г/ч. Обработку воды проводили в течение 30 минут. Объем обрабатываемой воды – 1000 мл. Концентрация озона в воде составляла 6,1 мг/дм³.

Для коррозионных испытаний использовались пластинки из углеродистой стали марки Ст3 размерами 30×30×2 мм.

Исследования проводили согласно ГОСТ 9.908. Элементный химический состав марки Ст3 приведен в таблице.

Таблица – Химический состав углеродистой стали марки Ст3

Марка стали	Содержание элементов, мас. %									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Fe
Ст 3	0,157	0,340	0,204	0,051	0,058	0,060	0,013	0,026	0,027	ост.

Динамика изменения скорости коррозии и зависимость величины удельной потери массы от времени углеродистой стали марки Ст3 в хлорсодержащих дезинфицирующих растворах и в водном растворе озона представлены на рисунке 1 и 2 соответственно.

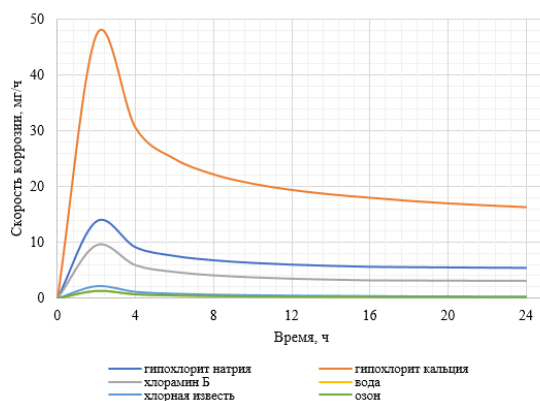


Рисунок 1 - Динамика изменения скорости коррозии стали марки Ст3 в исследуемых средах

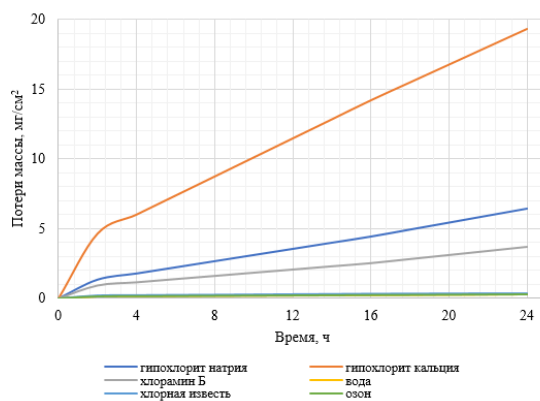


Рисунок 2 - Зависимость величины удельной потери массы стали марки Ст3 от времени в исследуемых средах

Согласно полученным данным, максимальная скорость коррозии наблюдается при 2 ч испытаний, дальнейшее уменьшение скорости коррозии во времени, вероятно, обусловлено по двум причинам: образованием на поверхности образца стали плотного коррозионного слоя, который препятствует дальнейшему ее растворению; уменьшением концентрации активного хлора в растворе, что приводит к снижению коррозионной активности среды. После 2 часов испытаний во всех коррозионных средах скорость коррозии стали практически не изменяется. Согласно полученным данным наиболее активно процесс растворения стали протекает в растворе гипохлорита кальция, что также подтверждается данными, представленными в статье [5]. Водный раствор хлорамина Б характеризуется наименьшей коррозионной активностью в ряду хлорсодержащих дезинфицирующих средств. Минимальная скорость коррозии стали наблюдается в водном растворе озона, которая равна скорости ее растворения в водопроводной воде. На основании проведенных исследований установлено, что использование озонированной воды для дезинфекции поверхности изделий, выполненных из углеродистой стали марки Ст3 более целесообразно с точки зрения коррозионной активности среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Romanovski, V.I. Ozone disinfection of water intake wells and pipelines of drinking water supply systems / V.I. Ramanouski [et al.]. // Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances. – 2013. № 3. – P. 51–56.

2. Романовский, В.И. Анализ эффективности дезинфекции сооружений питьевого водоснабжения с использованием хлорсодержащих дезинфицирующих средств и озона / В.И. Романовский [и др.]. // Вестник БрГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2015. – №2(92). – С. 68–71.

3. Романовский, В.И. Технические аспекты использования озона в водоподготовке / В.И. Романовский [и др.]. // Вода magazine. – 2016. – №2(102). – С. 36–41.

4. Романовский, В.И. Сравнительный анализ эффективности дезинфекции сооружений водоснабжения дезинфицирующими растворами / В.И. Романовский, И.В. Рымовская, С. Янь Фэн // Вода magazine. – 2015. – №10(98). – С. 18–21.

5. Romanovski, V. Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective / V. Romanovski, P.M. Claesson, Y.S. Hedberg // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – №27(11). – P. 12704–12716.

УДК 621.793

Т. А. Шичкова, канд. хим. наук, доц. (БГТУ, г. Минск);

Л. И. Степанова, канд. хим. наук, доц. (НИИ ФХП БГУ, г. Минск)

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕДИ И НИКЕЛЯ БОРОГИДРИДОМ

Реакции химического осаждения металлов (ХОМ) из растворов широко используются на практике для получения металлических покрытий в тех случаях, когда возможностей процессов электрохимического осаждения оказывается недостаточно, в частности при необходимости сплошной или избирательной металлизации непроводящих подложек. Процессы ХОМ обусловлены протеканием сопряженных реакций восстановления ионов металлов и окислением восстановителя, одновременно находящихся в растворе [1]. Помимо осаждения отдельных металлов процессы ХОМ используются и для получения сплавов. Закономерности протекания совместного восстановления ионов двух металлов из растворов определяются большим числом факторов: соотношением концентраций

солей восстанавливаемых металлов, природой и концентрацией лиганда, природой и концентрацией восстановителя, рН раствора, его температурой, условиями перемешивания и т. п. Варьируя указанные параметры, можно изменять как термодинамические (редокс-потенциал), так и кинетические (скорость разряда комплексных ионов) условия процессов восстановления каждого из ионов, что в свою очередь изменяет количественный и фазовый состав получаемых сплавов и, соответственно, их свойства.

Интересными с практической точки зрения являются сплавы никеля и меди. Легирование медью позволяет улучшить внешний вид покрытий, повысить износо- и коррозионную стойкость никелевых покрытий. Большинство исследований посвящено сплавам Ni-Cu, формируемым из гипофосфитных растворов, и вследствие этого содержащих дополнительно фосфор [2,3]. Поскольку медь каталитически неактивна в реакции восстановления гипофосфитом, продукты содержат ограниченные ее количества. Для повышения содержания меди в сплаве в качестве восстановителя можно использовать борсодержащие соединения, в частности борогидрид натрия, по отношению к которому реакции восстановления обоих ионов автокаталитичны. В этом случае содержание каждого из осаждаемых металлов в продукте реакции может колебаться от 0 до 100%, и он включает вместо фосфора бор, придающий металлическим покрытиям особые физико-химические свойства.

В сообщении приведены результаты исследования закономерностей совместного осаждения меди и никеля из водных растворов борогидридом натрия. Как уже отмечалось, ионы Cu(II) и Ni(II) достаточно легко восстанавливаются борогидридом в индивидуальном состоянии, при совместном же присутствии их ионов в цитратно-аммиачном растворе скорость осаждения сплава экстремально зависит от концентрации соли меди. Максимум скорости осаждения наблюдается при относительной концентрации соли меди, составляющей около 30-35 % от суммы молярных концентраций солей металлов. Характерно, что парциальная скорость восстановления каждого из металлов при осаждении сплава также экстремально зависит от концентрации их солей примерно с тем же положением максимума. Однако, если скорость восстановления ионов Cu(II) в максимуме превышает скорость выделения индивидуальной меди в 70 раз, то для никеля такое увеличение составляет всего 2-3 раза. Это позволило прийти к выводу, что формируемый продукт характеризуется повышенной каталитической активностью по отношению к реакции восстановления ионов Cu(II).

Установлено, что в отсутствие в растворе ионов аммония, продукт реакции содержит преимущественно медь, а в присутствии ионов

аммония в растворе при прочих равных условиях осаждаются сплавы, содержащие заметные (15–20 ат. % и более) количества никеля. Поляризационные исследования показали, что в присутствии ионов аммония в растворе разряд ионов Ni(II) протекает со значительно большей деполяризацией, чем ионов Cu(II), по сравнению с процессами катодного восстановления ионов этих металлов в отсутствие ионов NH₄⁺. Количественное содержание компонентов сплава изменяется с ростом толщины пленок. Установлено, что на скорость осаждения и состав сплава Cu-Ni влияет и природа каталитически активных центров, инициирующих реакцию химического восстановления: так, при осаждении на палладиевые и серебряные центров, сформированные одинаковым способом, скорость процесса осаждения во втором случае ниже, а содержание никеля и бора в покрытии всегда выше.

Согласно диаграмме состояния медь и никель неограниченно взаимно растворимы друг в друге, поэтому можно было ожидать формирования твердых растворов при любом соотношении металлов в сплавах. Однако исследование фазового состава осажденных сплавов с различным содержанием компонентов показало, что они представляют собой твердый раствор меди и бора в никеле (I) только при содержании меди около 7 ат. % (14,5 ат. % В), а при концентрации же меди 16,5 ат. % (13,0 ат. % В) пленки наряду с (I) содержат второй твердый раствор (II) на основе меди. При дальнейшем возрастании содержания меди в сплавах до 40,0 ат. % наряду с (I) пленки содержат фазу металлической меди, а выше 48,0 ат. %, фаза (I) исчезает, и пленки содержат только металлическую медь и оксид меди. Пленки с концентрацией меди 67,5 и более ат. % состоят из оксида меди.

Появление оксидно-гидроксидных соединений меди в составе пленок можно связать с известной из литературы возможностью протекания восстановления ионов меди борогидридом натрия при их высокой концентрации (в присутствии ионов аммония) по химическому механизму с образованием гидрида меди. В последующем это нестабильное соединение разлагается на водород и дисперсную медь, легко окисляющуюся при контакте с водой. Сложное фазовое строение сплавов Cu-Ni-B обуславливало и специфический характер термостимулируемых структурно-фазовых превращений этих сплавов, приводящих к формированию в результате прогрева твердого раствора меди в никеле и боридов никеля Ni₃B и Ni₂B.

Отметим, что низкая температура, при которой протекает процесс совместного восстановления, способствует формированию продуктов с высокой степенью однородности взаимного распределения отдельных

соосаждаемых компонентов. Это может приводить к образованию интерметаллических соединений и твердых растворов как равновесного, так и неравновесного составов, в том числе пересыщенных твердых растворов и гетерогенных систем, состоящих из отличающихся по составу зерен.

Пленки сплавов, полученные таким образом, как правило, относятся к разряду наноструктурированных систем, т. е. состоят из кристаллических или некристаллических зерен нанометрового размера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химическое осаждение металлов из водных растворов. Под ред. Свиридова В.В. 1987. Минск: Университетское. 270 с.
2. Винокуров Е.Г., Моргунов А.В., Скопинцев В.Д. Оптимизация состава химических никель-фосфорных покрытий, легированных медью. Неорганические материалы. 2015. Т.51. № 8. С. 859-863.
3. Винокуров Е.Г., Невмятулина Х.А., Жигунов Ф.Н., Скопинцев В.Д. Способ химического нанесения покрытий из сплава никель-медь-фосфор. Патент РФ № 2592601, 2015.

УДК 541.13.131.135.138+543.4.42.5.51

Н. Н. Костюк, канд. хим. наук, начальник отдела;
Т. А. Дик, д-р физ.-мат. наук, зам. декана (БГУ, г.Минск)

СИНТЕЗ УЛЬТРАЧИСТЫХ ХЕЛАТОВ САМАРИЯ (II) и (III)

Хелаты самария (II) и (III) используются в качестве прекурсоров для изготовления катализаторов тонкого органического синтеза и постоянных магнитов. Они также рассматриваются как перспективные вещества для изготовления лазерных рабочих сред, и светодиодов. В связи этим в настоящее время постоянно растет спрос на данные соединения. При этом большинство востребованных свойств хелатов самария напрямую зависят от степени их чистоты. Востребованы ультрачистые хелатные соединения.

Получение ультрачистых хелатных соединений связано с традиционными методами очистки: сублимация, зонная плавка, хроматографические методы и пр. Применение традиционных методов очистки сопряжено с эксплуатацией дорогостоящей аппаратуры и малыми выходами целевого продукта. Решением возникшей проблемы может быть поиск методов синтеза, которые способны без дополнительных приемов очистки давать ультрачистые соединения с выходом близким к количественному.

Из всех известных методов синтеза наиболее приемлемым с точки зрения получения ультрачистых хелатов самария (II) и (III) является электрохимический. Электролиз проводили в бездиафрагменной ячейке с регулируемой атмосферой при постоянном токе с анодом из металлического самария и никелевым катодом. В качестве лигандов использовались β -дикетоны (ацетилацетон, бензоилацетон, дибензоилметан, трифторацетилацетон, трифторпивалоилметан), комплексоны (этилендиаминтетраацетат и трилон Б). Электролиз осуществляли в среде ацетонитрила с фоновым электролитом (тетраэтиламмонийбромид).

Контроль чистоты полученных хелатов самария осуществляли масс-спектрометрически. Масс-спектры регистрировали на масс-спектрометре МХ-1320 до 2000 а.е.м. Комплексоны озолялись, растворялись в азотной кислоте и переводились в ацетилацетонаты. Порог чувствительности прибора составлял 10^{-4} %, что является достаточным для суммарного контроля примесей ультрачистых соединений. В окислительной атмосфере (воздух, O_2) были получены ультрачистые хелаты самария (III). В инертной атмосфере (Ar, He, N_2) в зависимости от условий электролиза получены ультрачистые соединения самария (II, III) или (II).

УДК 666.293-522.53

Н.А. Гвоздева, канд. техн. наук, доц.;

С.Л. Радченко, канд. техн. наук, доц.;

Л.Н. Новикова, канд. хим. наук, доц.;

Л.И. Хмылко канд. хим. наук, доц. (БГТУ, г. Минск)

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ФОСФАТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ

В последнее время актуальна тенденция изготовления строительной керамики, имитирующей по своей структуре природный гранит. Такие материалы, обладая хорошими декоративными характеристиками, отличаются высокими физико-механическими параметрами. Для получения керамического гранита используется окрашивание керамической плиточной массы жаростойкими пигментами. Керамические пигменты, используемые для этих целей, импортируются и имеют высокую стоимость. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является получение высокотемпературных пигментов широкой цветовой гаммы для объемного окрашивания на основе недефицитных материалов.

Основой для производства керамических красок являются пигменты. Для расширения палитры керамических пигментов и использования в качестве исходных компонентов нашли широкое применение природные сырьевые материалы, которые используются в качестве кристаллических решеток-акцепторов. К ним относятся: муллит, шпинель первого и второго типа, корунд, циркон, перовскит, диопсид, волластонит и др. При включении в решетку ряда минералов ионов переходных металлов (Cr^{3+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} и др.) они приобретают характерную окраску, которая обусловлена поглощением света за счет d-d-переходов электронов, либо за счет переноса заряда. Кроме того, с ионами-хромофорами могут образовываться твердые растворы вычитания и замещения. Вхождение в кристаллическую решетку перечисленных ионов обеспечивается твердофазными реакциями при температурах (1200-1300°C). Окраска пигментов зависит не только от химической природы вводимого иона-хромофора, но и от координации, в которой он находится, а также от уровня симметрии координационного полиэдра [1].

Целью работы является изучение возможности синтеза керамических пигментов на основе гидроксиапатита и разработка способов направленного регулирования процессов структуро- и фазообразования синтеза пигментов, обладающих высоким коэффициентом отражения света, установление взаимосвязи температурно-временных параметров синтеза, содержания вводимых ионов-хромофоров с типом и количеством формирующихся цветонесущих фаз.

Синтез пигментов осуществляли на основе гидроксиапатита, полученного из костяного шрота - промышленного отхода, являющегося продуктом переработки костей крупного рогатого скота при получении преципитата. Костяной шрот обжигали при температуре 800 °С. Химический состав обожженного шрота, мас. %: Na_2O – 0,91; MgO – 0,75; P_2O_5 – 29,39; CaO – 69,02. Костяной шрот после выгорания органических веществ содержит минеральную часть с массовым соотношением $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ равным 2,36, у гидроксиапатита оно равно 1,31, соответственно.

Синтез пигментов осуществлялся методом совместного помола полученного гидроксиапатита с оксидами CoO , NiO с последующим обжигом в интервале температур 1000–1100–1200°C с выдержкой при максимальной температуре 1 час.

В зависимости от вида используемого иона-хромофора и его концентрации в исследуемых системах были синтезированы пигменты широкой цветовой гаммы: голубого, зеленовато-голубого, серо-зеленого, серо-сине-зеленого, лазурного цвета. Синтезированные керамические

пигменты характеризуются однотонной, яркой и насыщенной окраской. Пигменты, обожженные при температуре 1000°C, обладают невысокими хромофорными свойствами, что свидетельствует о недостаточном количестве в них цветонесущей фазы. Выявлено, что оптимальная температура синтеза составляет 1200°C.

Для изучения хромофорных свойств синтезированных пигментов были получены кривые спектрального отражения на электронном спектрофотометре и спектрофотометре СФ-18 с автоматической записью спектров отражения в области длин волн 400–750 нм.

В ходе проведения эксперимента были определены коэффициент отражения и цветовые характеристики синтезированных пигментов оптимальных составов.

При повышении температуры обжига и содержания ионов-хромофоров Co^{2+} и Ni^{2+} увеличивается чистота цвета. Для кобальтсодержащих пигментов при концентрации ионов Co^{2+} 10% длина волны составляет 474-476 нм, а чистота цвета - 29-30%, а при концентрации ионов Co^{2+} 20% чистота цвета - 35-46 %.

Кривые отражения никельсодержащих пигментов с центральной полосой поглощения находятся в области длин волн 530 нм. Цвет пигментов изменяется от зеленого до темно-зеленого. Такое изменение цвета обусловлено наличием октаэдрического комплекса $[\text{NiO}_6]$, для которого характерны 3 максимума поглощения в разных областях спектра. Для никельсодержащих пигментов при концентрации ионов Ni^{2+} 10% чистота цвета составляет 20-25%, а при концентрации ионов Ni^{2+} 20% чистота цвета- 36-40 %.

Согласно данным рентгенофазового анализа фазовый состав синтезированных пигментов представлен в основном гидроксиапатитом $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, небольшим количеством дифосфата кобальта $\text{Co}_2\text{P}_2\text{O}_7$ и никеля $\text{Ni}_2\text{P}_2\text{O}_7$, оксидами кобальта и никеля. Вероятно, максимальная температура обжига 1200°C является недостаточной для формирования цветонесущих фаз и окраска пигментов обусловлена в основном адсорбцией ионов-хромофоров на поверхности гидроксиапатита.

По мере повышения температуры синтеза наблюдается увеличение интенсивности дифракционных максимумов дифосфата кобальта и никеля, и, как следствие, снижение интенсивности пиков их оксидов, что связано с протеканием процессов фазообразования.

Таким образом, при проведении исследований установлено, что при синтезе пигментов с использованием гидроксиапатита цветонесущая фаза образуется на поверхности зерен, поскольку его структура сохраняется в процессе обжига. Ионы-хромофоры частично диффундируют в аморфизированную структуру апатита.

В результате проведенной работы разработаны температурно-временные параметры синтеза и установлены количественные соотношения исходных компонентов шихт, обеспечивающих формирование цветонесущих фаз, высокую термическую и химическую стойкость. Установлены оптимальные составы с чистотой тона 35-45%, кислотоустойкостью к раствору 1 н. HCl 99,3-99,7%.

Пигменты разработанных составов могут быть рекомендованы для окрашивания керамических изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пищ, И.В. Керамические пигменты: учеб. / И.В. Пищ, Г.Н. Масленникова. – Минск: Вышэйшая школа, 2005. – 235 с.

УДК 541.15; 669.248

В.П. Евстигнеева, мл. науч. сотр. НИЧ;
Н.Г. Валько., доц., канд. физ. мат. наук; Д.И. Богдевич, студ.
(ГрГУ им. Янки Купалы, Гродно)

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ Ni/Au, СФОРМИРОВАННЫХ В ПОЛЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В связи с широким использованием в промышленности защитно-декоративных никелевых покрытий актуальным является разработка технологий электролитического получения композиционных покрытий (КЭП) с требуемыми эксплуатационными свойствами. Особый интерес представляет формирование КЭП с наночастицами благородных металлов, полученных методом лазерной абляции, которые модифицируют свойства гальванических покрытий благодаря своей наноразмерности, а также благодаря своим свойствам, приобретенным в процессе лазерной абляции [1].

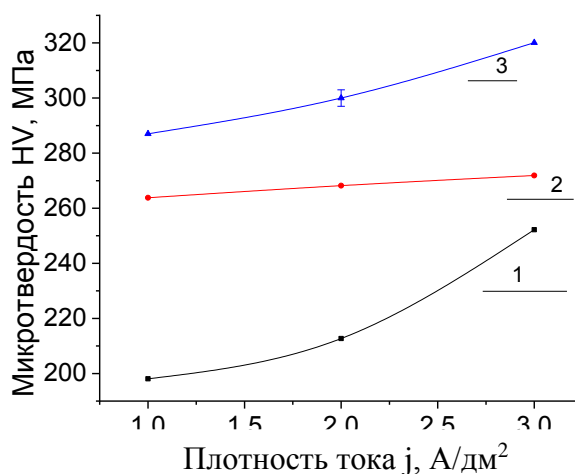
Одним из перспективных направлений является разработка методов формирования КЭП при воздействии ионизирующим излучением [2] на электрохимическую систему. Данное направление связано в первую очередь с совместным соосаждением ионов восстанавливаемых металлов и наночастиц благородных металлов на катоде из комплексных электролитов при облучении электрохимической системы ионизирующим излучением и распределением наночастиц покрытий по объему.

Целью данной работы было исследование влияния ионизирующего излучения на микротвердость покрытий на основе никеля, наноструктурированных наночастицами Au, полученных методом лазерной абляции.

Покрытия Ni/Au получали из промышленного электролита, (NiSO_4 – 170 г/л, MgSO_4 – 40 г/л, Na_2SO_4 – 60 г/л, NaCl (7,5 г/л), H_3BO_3 (27,5 г/л). Концентрация наночастиц золота в электролите составляла 0,5 г/л. Покрытия осаждались при плотностях тока от 1 до 3 А/дм². Получение наночастиц золота проводилось из золотой мишени методом лазерной абляции в дистиллированной воде с помощью Nd^{3+} :YAG-лазера (LS-2147 Lotis ТП).

Микротвердость покрытий Ni/Au измерялась на цифровом твердомере KASON 59-HV, согласно ГОСТ 2999 [3]. Исследовались покрытия, сформированные в поле рентгеновского (0,07 нм) и УФ-излучения (207 нм).

Результаты измерения микротвердости Ni/Au, полученных при различной плотности тока, облученных в процессе электроосаждения рентгеновским и УФ-излучением, приведены на рисунке 1.



1 – к.о.; 2 – обл. UV; 3 – обл. X-ray

Рисунок 1 – Зависимости микротвердости покрытий Ni/Au от плотности тока в поле ионизирующего излучения

На представленных зависимостях микротвердости от плотности тока осаждения КЭП Ni/Au и Ni/Au, полученных при УФ-излучении и рентгеновском излучении, видно увеличение микротвердости покрытий с ростом плотности тока осаждения, что связано формированием мелкозернистых покрытий при повышенной скорости электрокристаллизации в интервале рабочих плотностей тока.

Анализ зависимостей, полученных для образцов, осажденных в условиях облучения указывает, что воздействие рентгеновским излучением (0,07 нм) и УФ-излучением (207 нм) на электролит в процессе электроосаждения КЭП Ni/Au приводит к формированию покрытий с повышенной твердостью в сравнении с необлучаемыми образцами. Увеличение микротвердости покрытий связано с их плотностью, которая в свою очередь зависит от условий кристаллизации и количества наночастиц в покрытии. Поскольку электроосаждение велось при воздействии рентгеновским излучением и УФ-излучением на электролит, то можно предположить, что вследствие радиационно-химических превращений в облучаемых электролитах и интенсификации диффузионных процессов продуктами радиолиза происходит формирование КЭП Ni/Au с повышенной плотностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li, W.R Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on Escherichia coli. / Li WR, Xie XB, Shi QS, Zeng HY, Ou-Yang YS, Chen YB // Appl Microbiol Biotechnol. 2010 Jan;85(4):1115-22
2. Ануфрик, С.С. Влияние ионизирующего излучения на степень кристалличности композиционных Ni/Ag покрытий / С.С. Ануфрик, Н.Г. Валько, В.П. Евстигнеева, С.Н. Анучин // Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XXVI Междунар. науч. конф., Краснодар / оргкомитет: В.А. Исаев, С.С. Ануфрик, Е.В. Жариков, В.Б. Кравченко, Г.П. Яблонский, и др. - Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2020. - С. 120-124
3. ГОСТ 2999-75. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М.: Белорус. гос. комитет по стандартизации Республики Беларусь, 1992. – 31 с.

УДК 621.793:620.197

В.Г. Матыс, доц., канд. хим. наук; А. В. Тарасевич, магистрант;
В. В. Поплавский, доц., канд. физ.-мат. наук;
С. С. Мисюкевич, мл. науч. сотр.;
В.А. Ашуйко, доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

ПОКАЗАТЕЛИ ЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ Ti- И Zr-СОДЕРЖАЩИХ КОНВЕРСИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ГАЛЬВАНИЧЕСКОМ ЦИНКЕ

Цель работы – определение оптимальных электрохимических показателей защитной способности конверсионных покрытий на гальваническом цинке. При изучении защитных свойств конверсионных покрытий на

гальваническом цинке часто используют электрохимический метод. В этом методе снимают поляризационные кривые на поверхности исследуемых образцов в растворе NaCl, из которых определяют ток и потенциал коррозии. Ток коррозии считается непосредственной характеристикой скорости коррозии в электрических единицах. Однако часто получаемые значения токов коррозии не согласуются с результатами других методов определения защитной способности покрытий, например, методом капли, весовым методом или испытаниями в камере солевого тумана. Поэтому было бы интересно рассмотреть другие электрохимические показатели защитной способности и оценить их эффективность.

Конверсионные покрытия на поверхности оцинкованной стали получены методом окунания из трехкомпонентных растворов, содержащих соединения оксокатионов титана (TiO^{2+}) или циркония (ZrO^{2+}), гексафторосиликат натрия (Na_2SiF_6) и окислитель (H_2O_2 или $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$). Для изучения влияния состава растворов и длительности осаждения конверсионного покрытия на его защитные свойства ставился дробный факторный эксперимент 2^{5-2} отдельно для Ti- и Zr-содержащих растворов []. В эксперименте варьировались по определенному плану на двух уровнях сразу 5 факторов: x_1 – pH раствора; x_2 – тип окислителя (H_2O_2 или $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$); x_3 – концентрация оксокатионов TiO^{2+} (или ZrO^{2+}); x_4 – концентрация Na_2SiF_6 ; x_5 – длительность осаждения покрытия. Выходными параметрами эксперимента являлись электрохимические показатели защитной способности покрытий, получаемые электрохимическим методом в растворе 3% NaCl.

В качестве показателей защитной способности покрытий были выбраны наряду с потенциалом ($E_{\text{кор}}$) и плотностью тока коррозии ($i_{\text{кор}}$), потенциал разомкнутой цепи ($E_{\text{р.ц}}$) после выдержки в растворе NaCl в течение заданного периода времени (10 мин), плотность тока на поляризационной кривой при потенциале разомкнутой цепи ($i_{\text{р.ц}}$), потенциалы при некоторых выбранных плотностях тока (E_i) и плотности тока при некоторых выбранных потенциалах (i_E). Для оценки эффективности каждого показателя использовались результаты факторного эксперимента, а именно значимость эффектов факторов. Результаты факторного эксперимента представлялись в виде линейного уравнения, коэффициенты которого представляют собой эффекты исследуемых факторов на тот или иной показатель защитной способности. Значимость эффектов факторов определялась безразмерным критерием Стьюдента. Чем больше величина этого критерия, тем больше значимость эффекта фактора. Сумма этих критериев Стьюдента для каждого показателя защитной способности и выступала оценкой эффективности того или иного показателя защитной способности. Для учета воспроизводимости эксперимента и расчета критериев Стьюдента каждый опыт повторялся 2 раза.

Результаты факторного эксперимента для электрохимических показателей защитной способности конверсионных покрытий, полученных из Ti-содержащего раствора представлены в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{кор}} &= -1083 + 16x_3 - 15x_1x_3 \\
 ri_{\text{кор}} &= 5,44 - 0,26x_1x_3 \\
 E_{\text{р.ц.}} &= -1007 + 9x_1 - 11x_2 - 11x_4 - 9x_1x_2 - 18x_1x_3 \\
 ri_{\text{р.ц.}} &= 3,50 - 0,38x_5 \\
 E_i &= -987 + 8x_1 - 8x_2 + 8x_3 - 17x_4 - 12x_5 - 8x_1x_2 - 20x_1x_3 \\
 ri_E &= 3,17 - 0,41x_4 - 0,41x_5 - 0,49x_1x_3
 \end{aligned}$$

В уравнениях приведены только значимые коэффициенты (эффекты факторов) при уровне значимости 0,05. Показатели $ri_{\text{кор}}$, $ri_{\text{р.ц.}}$ и ri_E – отрицательные десятичные логарифмы соответствующих плотностей токов, выраженных в А/см². Потенциалы выражены в мВ. Как можно видеть число значимых коэффициентов для показателей $E_{\text{кор}}$ и $ri_{\text{кор}}$ – мало, тогда как для показателей E_i и ri_E – значительно больше. Аналогичные уравнения для показателей защитной способности конверсионных покрытий, полученных из Zr-содержащих растворов имеют вид:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{кор}} &= -1066 + 30x_4 + 24x_1x_2 - 38x_1x_3 \\
 ri_{\text{кор}} &= 5,30 \\
 E_{\text{р.ц.}} &= -976 - 6x_2 + 8x_4 - 10x_5 \\
 ri_{\text{р.ц.}} &= 3,79 + 0,28x_2 - 0,3x_3 + 0,44x_4 + 0,39x_5 + 0,4x_1x_2 + 0,58x_1x_3 \\
 E_i &= -965 - 10x_3 + 17x_4 + 10x_5 + 27x_1x_2 + 12x_1x_3 \\
 ri_E &= 3,4 - 0,22x_3 + 0,45x_4 + 0,19x_5 + 0,67x_1x_2 + 0,44x_1x_3
 \end{aligned}$$

Здесь также число значимых эффектов факторов для показателей E_i и ri_E намного больше, чем для показателей $E_{\text{кор}}$ и $ri_{\text{кор}}$.

Для оценки эффективности показателя нужно сравнить безразмерные критерии Стьюдента для эффектов факторов. Для показателей защитной способности Ti-содержащих конверсионных покрытий критерии Стьюдента эффектов факторов представлены в таблице 1. Жирным шрифтом выделены значимые при уровне значимости 0,05 эффекты факторов.

Таблица 1 – Критерии значимости эффектов факторов для показателей защитной способности Ti-содержащих конверсионных покрытий

Показатель	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_1x_2	x_1x_3	Σ
$E_{\text{кор}}$	0,8	1,7	2,6	1,6	2,1	0,4	2,4	11,6
$ri_{\text{кор}}$	1,7	0,4	0,2	0,8	0,5	0,5	2,3	6,4
$E_{\text{р.ц.}}$	2,4	3,0	0,9	3,1	0,1	2,3	4,8	16,6
$ri_{\text{р.ц.}}$	0,3	1,9	1,0	1,1	2,6	0,7	1,0	8,6
E_i	2,5	2,6	2,6	5,3	4,1	2,5	6,4	26,0
ri_E	1,0	1,4	1,5	2,4	2,5	0,9	3,0	12,7

Критерии значимости для показателей защитной способности Zr-содержащих покрытий представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Критерии значимости эффектов факторов для показателей защитной способности Zr-содержащих конверсионных покрытий

Показатель	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_1x_2	x_1x_3	Σ
$E_{\text{кор}}$	1,3	0,2	1,6	4,7	0,2	3,9	6,0	17,9
$ri_{\text{кор}}$	0,2	1,5	0,6	1,3	1,2	0,8	0,04	5,6
$E_{\text{р.ц.}}$	2,1	2,4	0,1	3,0	3,9	1,8	0,1	13,4
$ri_{\text{р.ц.}}$	2,2	2,4	2,6	3,8	3,4	3,5	5,0	22,9
E_i	0,8	1,1	2,5	4,2	2,4	6,5	3,0	20,5
ri_E	0,8	1,4	4,4	9,1	3,9	13,7	9,0	42,3

Как видно из таблиц 1 и 2 наиболее эффективными показателями защитной способности покрытий можно считать потенциал при выбранной плотности тока E_i , и плотность тока при выбранном потенциале ri_E , для которых сумма критериев значимости максимальна. Для выбора плотности тока i при которой определялся потенциал E_i строилась зависимость критериев значимости от плотности тока и выбиралась плотность тока, для которой критерии значимости были наибольшими. Так было установлено, что оптимальной плотностью тока оказалось значение $\sim 10^{-3,5}$ А/см², для которой и представлены в таблицах данные. Аналогично выбиралось значение потенциала для показателя ri_E . Было установлено, что оптимальное значение потенциала составляло от «минус» 0,97 до «минус» 0,95 В (х.с.э.). Выбранные значения потенциала и плотности тока на поляризационных кривых соответствуют области резкого увеличения анодного тока окисления цинка.

Таким образом, было установлено, что наиболее эффективными электрохимическими показателями защитной способности покрытий являются потенциал E_i , соответствующий плотности тока $10^{-3,5}$ А/см² и отрицательный десятичный логарифм плотности тока ri_E , при потенциалах от «минус» 0,97 до «минус» 0,95 В (х.с.э.), которые получали из поляризационных кривых исследуемых покрытий в 3 % растворе NaCl.

И. Е. Малашонок, доц., канд. хим. наук;
О. И. Салычиц, ст. преп., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ СТУДЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ХИМИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ

В 2020 году пандемия коронавирусной инфекции COVID-19 затронула все сферы жизни, в том числе и систему образования. Значительно возросла доля самостоятельной работы студентов в процессе обучения. Возникла вынужденная необходимость организации дистанционной внеаудиторной работы студентов.

На кафедре химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники БГТУ использование дистанционных образовательных технологий осуществлялось с 2015/2016 учебного года. В университете в течение ряда лет функционировала система дистанционного обучения (СДО) на основе LMS Moodle, в которой преподаватели кафедры создали авторские электронные учебные курсы по дисциплинам «Теоретические основы химии» и «Неорганическая химия» и использовали их в своей педагогической деятельности. До 2020 года был накоплен значительный опыт, показывающий, что систематическая работа студентов в среде Moodle в комбинации с традиционной формой обучения позволяет обеспечить высокое качество образования [1].

В начале 2020 года в связи со сложной эпидемиологической обстановкой не только в Республике Беларусь, но и во всем мире, возникла необходимость проведения дистанционного образовательного процесса, а также других форм обучения на качественно новом уровне. В отличие от традиционных форм проведения лекционных и практических занятий возникла необходимость изложения и обсуждения нового материала в формате видеоконференций. К этому моменту студенты первого курса уже 7 месяцев использовали обучающую платформу Moodle, были знакомы с особенностями работы в этой системе и подготовлены к более полному переходу в онлайн обучение.

В основу дистанционной формы обучения заложен принцип самообучения, как для студентов, так и для преподавателей, поскольку качество реализации принципа самообучения студентов во многом зависит от содержания учебных материалов и организации внеаудиторной самостоятельной работы студентов. Важной задачей для преподавателей является совершенствование электронных учебных курсов, чтобы новые формы обучения давали высокий результат по степени качества самостоятельной работы студентов.

Дополнительно к существующим электронным учебным курсам для студентов очной формы получения образования были созданы и размещены в СДО БГТУ на базе Moodle учебные курсы по дисциплинам «Общая и аналитическая химия» и «Общая, неорганическая и физическая химия» для заочной формы получения образования. Содержание всех курсов структурировано и выглядит следующим образом:

1. Информационная часть содержит сведения о выполнении элементов курса в виде сообщений, чатов, новостных форумов.

2. Вводная часть содержит вопросы коллоквиумов, экзаменационные вопросы, список рекомендуемой литературы.

3. Основная часть включает:

а) лекционный материал – излагаемая на лекциях теоретическая информация, примеры решения типовых задач с подробным разбором решения. Наличие в курсе лекционного материала позволяет изучить его в случае невозможности очного присутствия студента на лекции;

б) дополнительные материалы к лекции – презентации, методические пособия, видеоматериалы или ссылки на них – способствуют более глубокому усвоению теоретического материала;

в) задания для самостоятельной работы студентов, выполнение которых предусматривает знание теории, умение решать задачи. Самостоятельная работа предполагает, что студент просматривает учебный лекционный и дополнительный материал по теме, выполняет тренировочные тесты и индивидуальные контрольные задания, в том числе с ограничениями по времени и дате выполнения;

д) текущая аттестация по разделам курса позволяет оценить степень усвоения учебного материала. При выполнении задания типа «Эссе» возможен ввод текста и загрузка файлов с компьютера студента, при проверке которого преподаватель может не только выставить оценку за работу, но и добавить свои комментарии. На этапе проверки знаний студенты выполняют контрольный тест по пройденному материалу, получают отметку и комментарии преподавателя по неправильно выполненным заданиям теста.

4. Итоговая аттестация по всему курсу в конце семестра.

Каждое задание теста или контрольной работы оценивается в баллах. Максимальный балл, который может получить студент, равен десяти. Если студент набрал меньше 7 баллов, то он обязательно выполняет работу над ошибками с помощью преподавателя и повторно выполняет новый вариант тестов или контрольной работы. Полученные баллы позволяют выстроить общий рейтинг успеваемости студентов в рамках самостоятельной дистанционной работы, что способствует повышению объективности в оценке работы студента в целом за

период изучения дисциплины. Все результаты работы студентов отражаются в электронном журнале и хранятся на сервере БГТУ.

Данная форма организации работы студентов не только весьма актуальна, но и вызывает значительный интерес у студенческой аудитории, о чем свидетельствуют результаты независимого онлайн-опроса студентов средствами сервиса Google Формы: 87,5 % опрошенных считают необходимым сочетание дистанционной и традиционной форм получения знаний и только около 6 % опрошенных склоняются к традиционной форме образовательного процесса. Для студентов заочной формы обучения необходимость организации самостоятельной дистанционной работы в межсессионный период практически абсолютна (более 95 % опрошенных).

В качестве основных преимуществ дистанционной самостоятельной работы студенты отметили более легкий доступ к учебным материалам (81,3 %), гибкость при выборе места и времени самостоятельной работы (68,8 %) и фактически моментальный отзыв преподавателя и отчет о своей успеваемости (43,8 %). Интересно, что для большинства студентов среди всех элементов курса наиболее эффективно и удобно в дистанционном формате проведение коллоквиумов (75 %) и практических (семинарских) занятий (56,3 %), которые, как раз, и содержат большую долю самостоятельно работы студента. Следует отметить устойчивую корреляцию между экзаменационной оценкой студентов и рейтингом по результатам самостоятельной дистанционной работы (в 95 % случаев оценка объективна).

Таким образом, в рамках описанного подхода рассмотрены некоторые аспекты применения системы Moodle для организации самостоятельной работы студентов при изучении химических дисциплин. Организация самостоятельной работы в дистанционном формате при должном профессиональном и творческом подходе преподавателя и индивидуальной заинтересованности студента в получении новых знаний, безусловно, повышает качество всего образовательного процесса особенно в условиях сложной эпидемиологической обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малашонок И.Е., Салычиц О.И. Использование системы управления обучением moodle при подготовке студентов химико-технологических специальностей. Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века: XI Международная научно-методическая конференция, г. Минск, 12–13 дек. 2019 г. / БГУИР. – Минск, 2019. – С. 192.

В.В. Яскельчик, ассист.;
А.А. Черник, зав. кафедрой Х,ТЭХП и МЭТ, канд. хим. наук
(БГТУ, г. Минск)

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ ЛАТУНИ

Современное производство развивается в направлении создания малоотходных и безотходных технологий. Обработка металлов резанием – один из основных способов изготовления деталей – экономически невыгодна, т. к. более 60 % металла теряется. Метод порошковой металлургии позволяет снизить отходы до 10 %.

Суть метода состоит в получении порошка металла одним из известных способов: механическим, физико-химическим или смешанным, с последующим спеканием детали в заранее изготовленных формах с минимальными допусками. Одним из широко используемых металлов в порошковой металлургии является латунь. Порошки латуни в сварочной технике применяют для наплавки, спецрезки, изготовления обмазок. В машиностроении и приборостроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности латунные порошки используют для изготовления износостойких деталей машин и механизмов, изделий с высоко- или антифрикционными свойствами.

В ходе исследований электрохимического получения порошка латуни провели серию экспериментов по установлению состава электролита. В результате этого был получен уникальный по составу электролит, г/л: CuSO_4 – 9,6, ZnSO_4 – 9,72, Сорбитол – 10,8, NaOH – 22, NH_3 – 1,7. Исследования процесса электрохимического получения порошка латуни проводили при стационарных и нестационарных токовых нагрузках с использованием потенциостата-гальваностата ПИ-50-Pro, потенциостата-гальваностата Autolal PGSTAT 302N, источника питания постоянного тока Б5-81/1. В качестве рабочего электрода использовали алюминиевую проволоку. Вспомогательными электродами были графит и латунь, а электрод сравнения – хлорсеребряный. Поляризационные исследования проводили в исследуемых электролитах при скорости линейной развертки потенциала 5 мВ/с.

На рисунке 1 приведены катодные поляризационные кривые, полученные на алюминиевой проволоке из разработанного электролита для получения порошков латуни.

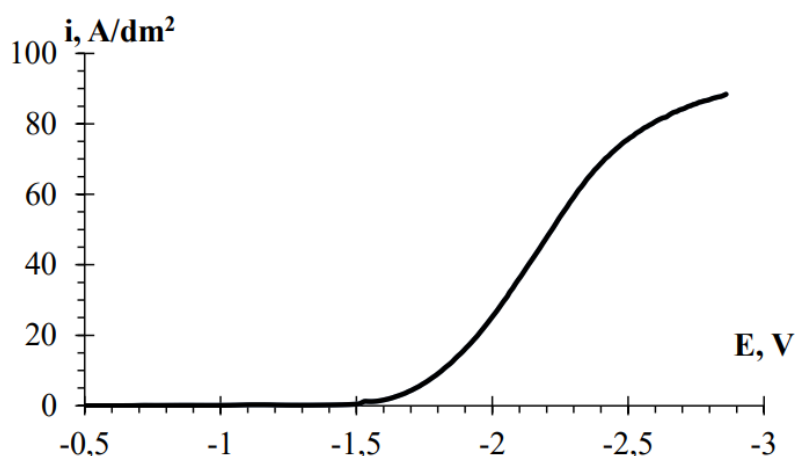


Рисунок 1 – Поляризационная кривая получения порошка латуни при стационарных условиях электролиза

Из поляризационной кривой (рисунок 1) следует, что равновесный потенциал алюминиевого электрода в щелочном растворе для получения порошка латуни составил -0,42 В. При смещении потенциала в электроотрицательную область (до -1,44 В) происходило электроосаждение сплава без диффузионных ограничений. В области потенциалов -1,62 – -2,41 протекало электрохимическое получение порошка латуни. Параллельно с электроосаждением порошка латуни протекал процесс выделения водорода, что могло значительно снижать выход по току основного процесса (рисунок 2). Изучение зависимости выхода по току от плотности тока проводили с использованием ультразвукового (УЗ) поля и без него.

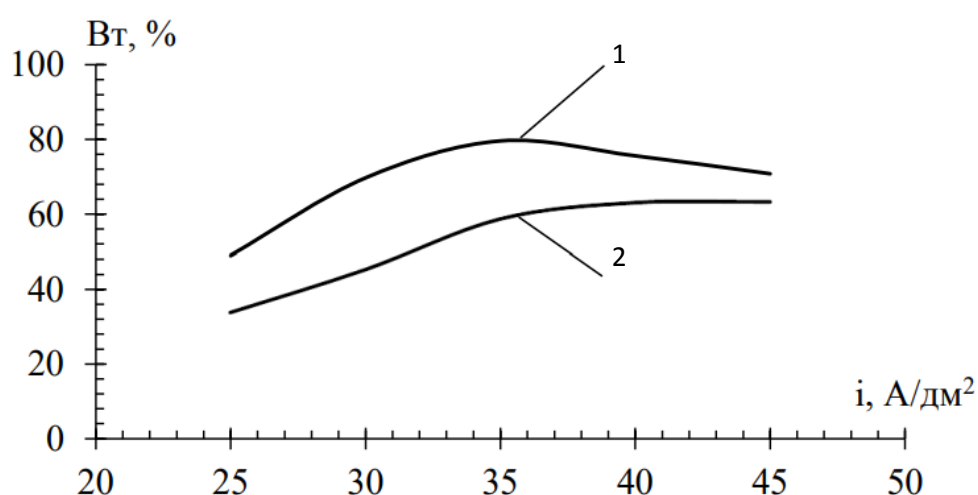


Рисунок 2 – Зависимость выхода по току от плотностей тока порошков латуни: 1 – в УЗ поле, 2 – без УЗ

Максимальный выход по току на кривой 1 (рисунок 2) наблюдается при плотности тока 35 А/дм^2 , а минимальный при плотности тока 25 А/дм^2 . Максимальный выход по току на кривой 2 (рисунок 2) наблюдается при плотности тока 43 А/дм^2 , а минимальный при плотности тока 25 А/дм^2 . Средний выход по току без УЗ составил $52,24\%$, а с применением УЗ – $68,94\%$.

Полученные порошки латуни исследовали с помощью оптического микроскопа с последующим электронным увеличением до $4000\times$ (рисунок 3).

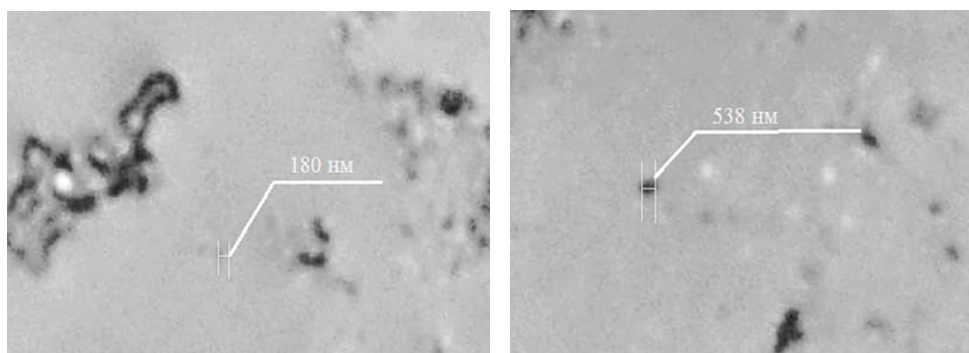


Рисунок 3 – Микрофотографии частиц порошка латуни при увеличении $4000\times$

Порошки латуни, представленные на рис. 3 были получены методом электролитического осаждения из щелочного сорбатного электролита при плотности тока 35 А/дм^2 . Отдельные частицы, которые не образовывали агрегаты порошка латуни, имели размер от $0,2$ до $0,7 \text{ мкм}$.

Таким образом, для электрохимического получения порошков латуни был разработан уникальный состав щелочного сорбатного электролита, содержащий соли меди, цинка, сорбитол, а также аммиак и гидроксид натрия для поддержания щелочной среды. Установлено, что рабочий диапазон плотностей тока при электроосаждении порошков латуни составил $25\text{-}45 \text{ А/дм}^2$ с выходом по току от $22,4$ до $79,5\%$. Максимальные размеры агрегатов порошка составляли 500 мкм , а минимальные размеры обособленных частиц – 150 нм .

П.С. Родионова, студ.;
П.Б. Кубрак, доц., канд. хим. наук;
В.В. Яскельчик, ассист. (БГТУ, Минск)

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ТИТАНА В ГЛИЦЕРИНОВЫХ РАСТВОРАХ МИНЕРАЛЬНЫХ КИСЛОТ

Электрохимическое полирование (ЭХП) металлов заключается в их анодной обработке, в результате которой происходит электрохимическое растворение поверхностного слоя металла и удаление дефектного слоя, образовавшегося при проводившихся ранее механических или термических операциях. Формируется новый поверхностный слой с меньшей высотой микронеровностей, сглаженным рельефом поверхности, не содержащий трещин, инородных включений, скрытых дефектов.

Электрохимическое полирование применяют для обработки труб, пружин, турбинных лопаток, ряда деталей, работающих в условиях трения и знакопеременных нагрузок, для декоративной отделки ювелирных украшений. Электрохимическое полирование незаменимо при обработке полупроводников в связи с тем, что позволяет получить поверхность со стабильными электрофизическими характеристиками [1].

Электрохимическое полирование находит распространение в таких технологических процессах, как хромирование автомобильных дисков и производство мебели, нанесение любых покрытий на металлы и автомобильный тюнинг, восстановление деталей методом осталивания и подготовка заготовок к гальваническим процессам [2].

Электролиты для полирования титана содержат: пассиватор – сульфаты, нитраты, хроматы; активатор – фториды, оксалаты; а также различные добавки органических соединений, играющие роль ингибиторов травления.

Состав и режим типичного электролита полирования следующие: CrO_3 – 500 г/л; $\text{HF}_{\text{конц}}$ – 160 мл/л; Температура – 16–21 °С; i_a – 20–50 А/дм²; U – 5–7 В [3]. Однако такой электролит является высоконцентрированным на основные компоненты, тем самым представляя из себя большую экологическую опасность. Для решения этой проблемы предлагается применение электролита на основе глицерина в качестве растворителя, а также малых количеств плавиковой кислоты и азотнокислого аммония. Исследования качественных характеристик полирования титана проводили с использованием электролитов, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Составы исследуемых электролитов

Компоненты	Моляльность, моль/кг растворителя(глицерин)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HF, в т.ч. HF и H ₂ O	5 7,5	5 7,5	5 7,5	5 7,5	5 7,5	8 12	8 12	5 7,5	5 7,5	5 7,5
NH ₄ NO ₃	-	0,16	0,62	0,78	1,56	1,56	1,56	-	-	-
C ₁₂ H ₂₅ SO ₄ Na	-	-	-	-	-	-	9 · 10 ⁻⁵	-	-	-
C ₁₆ H ₃ N(CH ₃) ₂	-	-	-	-	-	-	-	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴
Sr(NO ₃) ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0,11	0,22
Компоненты	Моляльность, моль/кг растворителя(глицерин)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
HF, в т.ч. HF и H ₂ O	5 7,5	12 18	12 18	12 18	12 18	12 18	12 18	12 18	12 18	12 18
NH ₄ NO ₃	-	-	0,72	0,78	0,94	1,09	1,25	1,41	1,56	1,72
C ₁₂ H ₂₅ SO ₄ Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C ₁₆ H ₃ N(CH ₃) ₂	1 · 10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sr(NO ₃) ₂	0,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Методом апробации установлено, что наилучшими качественными характеристиками полирования обладает титан, обработанный в электролитах № 12-20. Данное соотношение травящего вещества и растворителя является обоснованными с точки зрения экологичности и работоспособности.

Для снижения активного растворения добавлялся азотнокислый аммоний в качестве пассиватора. Окончательный выбор концентраций были выбраны после проведения потенциостатических исследований при скорости развёртки 0,01 В/с и с шагом 0,01 В.

Анодные поляризационные кривые для электролитов, содержащих азотнокислый аммоний сдвигаются в область меньших анодных токов, что указывает на наличие пассивации и позволяет проводить процесс полирования при меньших токовых нагрузках. В электролите №7 наблюдается возрастающий линейный участок, позволяющий увеличивать скорость полирования титана в данном электролите.

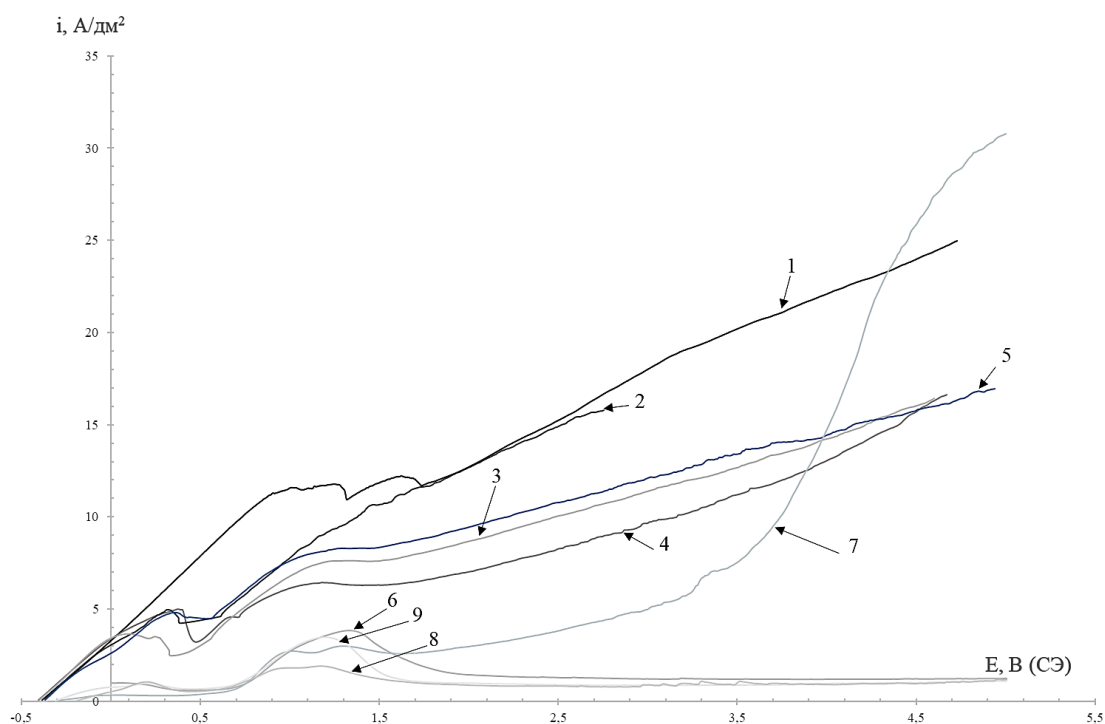


Рисунок 1 – Потенциостатические анодные кривые для электролитов состава HF, в том числе HF – 12 моль/кг, H₂O – 18 моль/кг: 1) NH₄NO₃ – 0 моль/кг; 2) NH₄NO₃ – 0,72 моль/кг; 3) NH₄NO₃ – 0,78 моль/кг; 4) NH₄NO₃ – 0,94 моль/кг; 5) NH₄NO₃ – 1,09 моль/кг; 6) NH₄NO₃ – 1,25 моль/кг; 7) NH₄NO₃ – 1,41 моль/кг; 8) NH₄NO₃ – 1,56 моль/кг; 9) NH₄NO₃ – 1,72 моль/кг

В данных электролитах было проведено полирование титана при токовых нагрузках 5, 10, 15 и 20 А/дм² в течении 3, 5 и 10 минут с изучением влияния составов, токовых нагрузок и времени электролиза на качественные показатели полирования (блеск, съём и шероховатость). Съём металла определяли гравиметрически на аналитических весах, блеск определяли на блескомере относительно серебряного зеркала, шероховатость определяли на профилограф-профилометре. Результаты исследований в данном электролите приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты исследования влияния условий электролиза

Плотность тока, А/дм ²	Время электролиза, сек	Съём, мкм	Блеск, %	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм
1	2	3	4	5	6	7
5	180	3,67	2,7	0,621	2,952	4,735
5	300	5,58	2,9	2,02	6,116	11,003
5	600	18,2	10,8	2,249	8,11	13,629
10	180	7,34	7,4	0,281	0,618	1,559
10	300	10,1	10,1	0,615	2,23	3,416
10	600	32,15	12,8	0,938	1,962	5,852
15	180	11,87	6,8	0,589	2,257	5,25

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
15	300	13,88	28,8	0,363	1,148	2,225
15	600	50,66	6,2	1,051	4,176	6,444
20	180	13,37	5,3	0,336	1,37	2,173
20	300	26,33	10,1	0,373	1,579	2,486
20	600	112,1	9,3	0,746	1,635	3,905

Таким образом, наилучший результат полирования достигался в электролите следующего состава: HF, в том числе HF – 12 моль/кг, H₂O – 18 моль/кг; NH₄NO₃ – 1,41 моль/кг в стационарном токовом режиме при плотности тока 15 А/дм² и времени электролиза 5 минут. Полирование в таких условиях способствовало выравниванию, появлению интенсивного блеска и относительно меньшему съёму в сравнении с используемыми электролитами в нынешнее время [1]. Такой электролит является намного более разбавленным по агрессивным компонентам, тем самым способствует снижению экологической опасности технологического процесса полирования титана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальванотехника: Справ. изд / Под общ. ред. А.М. Гинберга, А.Ф. Иванова, Л.Л. Кравченко. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
2. Электрохимическая полировка: описание, применение, материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nzmetallspb.ru/tehnologii/elektrohimicheskaya-polirovka-opisanie-primenenie-materialy.html> – Дата доступа: 25.12.2020.
3. Грилихес С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов/ С.Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 101 с.

П. Б. Кубрак, доц., канд. хим. наук;
В. В. Яскельчик, ассист.;
В. М. Кравченко, студ. 4 к. 11 гр., ф-т ХТиТ;
И. А. Тромза, студ. 5 к. 11 гр., ф-т ХТиТ (БГТУ, г. Минск)

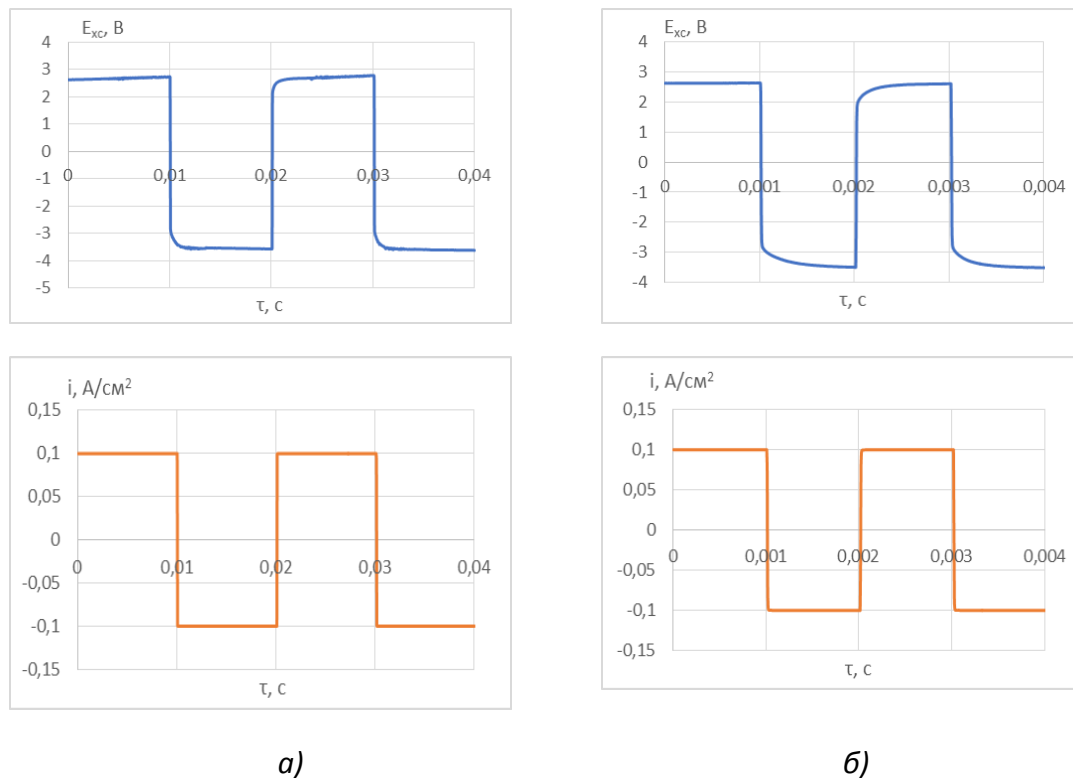
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ СТАЛИ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА В РАСТВОРАХ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ

Высокое содержание углерода или присутствие в структуре фаз внедрения (карбиды, нитриды, бориды, силициды), сформированных в результате термического или химико-термического упрочнения в высокоуглеродистых сталях, обуславливает пониженную обрабатываемость при использовании существующих процессов электрохимического полирования. В литературе приводится множество составов электролитов полирования, но они, в основном, относятся к обработке легированных и нержавеющей сталей, и практически отсутствуют сведения о процессе электрополирования высокоуглеродистых сталей, имеющих применение в инструментальном производстве [1]. Для снижения травящего действия компонентов электролитов полирования в их состав вводят ингибиторы органической и неорганической природы. Однако в этом случае определенную трудность представляет обеспечение воспроизводимости результатов электрополирования. Научный интерес представляет исследование процесса полирования инструментальных сталей в электролитах различного состава, в частности, с использованием органических растворителей.

В работе осуществлен подбор составов электролитов на основе органических растворителей с добавлением минеральных кислот для полирования высокоуглеродистых сталей марок У10 и 65Г. Наиболее перспективным с технологической точки зрения оказались растворы на основе диметилсульфоксида (ДМС). Электрохимические исследования в таких электролитах показали наличие диффузионных ограничений при анодной поляризации образцов, свидетельствующих об образовании вязких пленок на поверхности металла в соответствии с пленочной теорией полирования.

Установлено, что при проведении обработки стальных образцов в растворах, содержащих 60–70%об. ДМСО и 40–30%об. ортофосфорной кислоты, в стационарном режиме электролиза увеличения блеска и снижения шероховатости не происходит. Аналогичные результаты наблюдались и при использовании импульсного электролиза в широком диапазоне плотностей токов и длительностей импульсов.

Наибольший интерес представлял реверсивный режим электролиза в связи с возможностью кратковременной катодной поляризации обрабатываемой поверхности, позволяющей перераспределить центры ее растворения и пассивации.



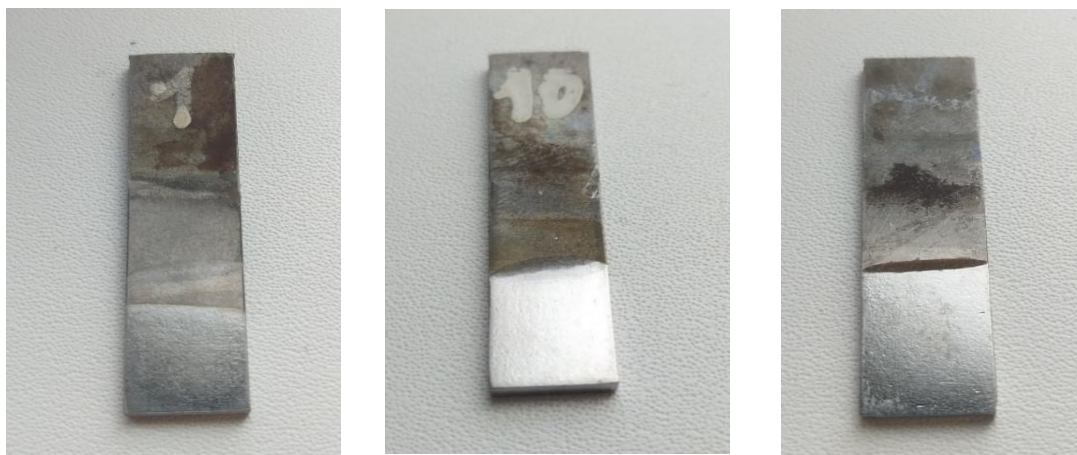
а

б

Температура 20°C; состав раствора ДМСО/Н₃РО₄ (%об.) – 50/50
Рисунок 1 – Осциллограммы тока и потенциала полирования стали 65Г в реверсивном токовом режиме

Как видно из осциллограмм, (рисунок 1), время установления потенциала при перемене полярности составляет не менее чем 0,001 с, достаточного для перезарядки поверхности и частичного удаления анодных продуктов за время катодной паузы. Установлено, что наиболее эффективно электрополирование высокоуглеродистой стали при использовании реверсивного режима происходит при длительности катодных и анодных импульсов 0,01 с и амплитудной плотностью тока 5–10 А/дм², при температуре не выше 40°C. При таких условиях происходит выравнивание поверхности на 1–2 класса шероховатости, с удельной эффективностью полирования до 40% и более, многократное повышение блеска до 30% и более относительно серебряного зеркала, а также происходит увеличение коррозионной стойкости более чем в 1,5 раза (рисунок 2). При более длительных импульсах тока при по-

лировании увеличения блеска поверхности стальных образцов не происходит вследствие повышения скорости растравливания. В тоже время, при длительности импульсов менее 0,01 с перераспределение активных центров и очистка поверхности от продуктов анодного растворения происходят не в достаточной мере, что не приводит к увеличению степени блеска и снижению шероховатости образцов.



а)

б)

в)

Температура 20°C, режим – реверсивный: длительность анодных и катодных импульсов – 0,01 с: состав раствора ДМСО/Н₃РО₄ (%об.) и плотность тока:
а – 50/50 и 10 А/дм²; б – 60/40 и 7 А/дм²; в – 70/30 и 5 А/дм²

Рисунок 2 – Фото образцов после электрополирования в электролитах, содержащих ортофосфорную кислоту

Определено, что введение в фосфорнокислый электролит серной кислоты до 10%об. позволяет на 10–12% увеличить степень блеска полируемой поверхности образцов, однако, при этом происходит ухудшение коррозионной стойкости изделий в два раза по сравнению с необработанными образцами.

В результате ресурсных испытаний фосфорнокислого электролита установлено, что качественные характеристики процесса полирования сохраняются в течение 80 А·ч/л. Разработанный фосфорнокислый электролит полирования отличается низкой токсичностью, экологичностью и достаточно высокими эксплуатационными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грилихес, С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойство металлов / С.Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, 1987. – 232 с.

УДК: 541.124:542.952.6:547.313

А.В. Пянко А.В., ассист.; О.П. Бачко, студ.;
П.Б. Кубрак, доц., канд. хим. наук;
О.А. Алисиенок, доц., канд. хим. наук;
А.А. Черник, доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Sn-Ni

В настоящее время потребность в улучшенных эксплуатационных характеристиках материалов увеличивается, что приводит к разработке новых нанокomпозиционных покрытий. Перспективным направлением в исследованиях является разработка и исследование материалов с исключительными физическими, химическими и функциональными свойствами. Одним из методов улучшения физико-химических, механических, биоцидных свойств покрытий является электрохимическое формирование композиционных покрытий.

Для придания металлической поверхности улучшенных физико-химических и механических свойств в качестве инертной фазы может выступать нанокomпозит $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ [1], который широко используется в реакциях фотогидротации органических загрязнений и разложении модифицирующих микроорганизмов. В качестве металлической матрицы может использоваться сплав олово-никель. Данный сплав отличается высокой коррозионной стойкостью, привлекательным внешним видом, не вызывает раздражения при контакте с кожей человека. Области применения сплава олово-никель являются производство печатных плат, защитно-декоративное покрытие в для изделий из меди и стали.

Внедрение в его структуру нанокomпозиционного материала $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ может способствовать повышению микротвердости, фотокаталитических и антибактериальных свойств металлической поверхности.

В качестве исследуемого электролита выбран фторид-хлоридный электролит из-за его низких рабочих значений. Оптимальными режимами электрохимического осаждения являлись: $T = 70\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 2,5\text{--}3,0$.

При исследовании кинетики осаждения композиционных покрытий на основе сплава олово-никель установлено, что формирование покрытия протекает с эффектом деполяризации. Повышение температуры электролита способствует снижению катодного перенапряжения. Установлено, что при увеличении концентрации нанокomпозита $\text{SiO}_2\text{--}$

TiO₂ в электролите возрастают шероховатость и микротвердость формируемых композиционных покрытий.

Наиболее высокими значениями микротвердости обладали покрытия с введением SiO₂-TiO₂ с концентрацией в электролите 6 г/л. Твердость таких покрытий составляла порядка 458 HV.

Увеличение шероховатости покрытий обусловлено внедрению более высокого количества наноразмерного диоксида титана в структуру покрытия, что согласуется с результатами элементного анализа. Наиболее высокое содержания TiO₂ в покрытии наблюдается для покрытий, осажденных из электролита с 6 г/л диоксида титана, и составляет 1,65 масс.%. При этом осажденные покрытия сплошные, беспористые, обладают высокими декоративными свойствами (рисунок 1).

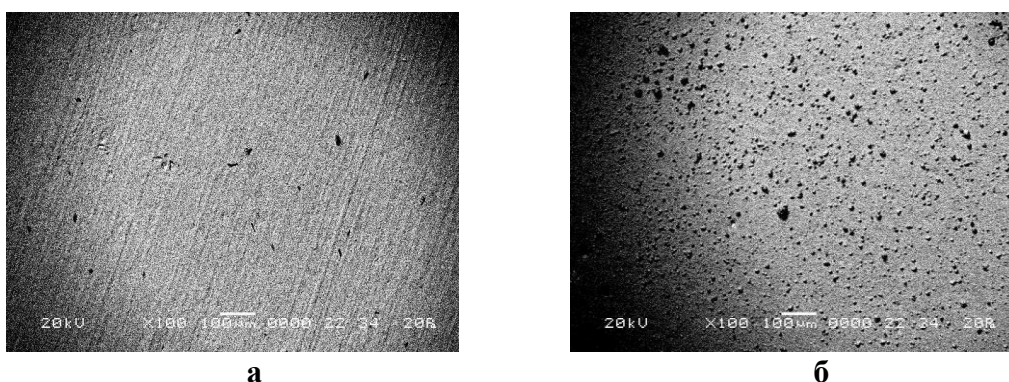


Рисунок 1 – СЭМ изображения композиционных электрохимических покрытий: а) Sn-Ni; б) Sn-Ni- SiO₂/TiO₂ (6 г/л)

Установлено, что при электрохимическом осаждении покрытия Sn-Ni- SiO₂/TiO₂ с концентрацией наноконкомпозита 6 г/л (рисунок 6, б) на поверхности образцов образуются сфероиды диаметром 3 мкм. Это может свидетельствовать о включении SiO₂/TiO₂, вводимого в состав электролита, в структуру формируемых покрытий.

Таким образом, введение SiO₂/TiO₂ в состав фторид-хлоридного электролита осаждения сплава олово-никель, позволяет сформировать композиционные покрытия, обладающие повышенной микротвердостью, хорошей адгезией к подложке, высокими декоративными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pyanko, A.V. Tin-Nickel-Titania composite coatings / A.V. Pyanko, I.V. Makarova, D.S. Kharitonov et al. // Inorg. Materials. – 2019. – V. 55. Issue 6. – pp. 568–575.

УДК 674.055:621.934(043.3)

В. В. Жилинский, канд. хим. наук, доц.;
В. В. Чаевский, канд. физ.-мат. наук, доц.;
Т. Н. Филипович, мл. науч. сотр. (БГТУ, г. Минск)

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ КАТОДОВ-МИШЕНЕЙ ДЛЯ ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ

Одной из основных характеристик, определяющих работоспособность инструмента, является период стойкости и прочность удержания ионно-плазменное покрытия на поверхности режущей кромки ножа. В процессе работы при высоких скоростях резанья происходит разогрев до 500°C режущей кромки и ионно-плазменного покрытия, которое под действием внутренних напряжений термического расширения подвергается повышенному износу и растрескиванию. По мере появления трещин образующийся абразивный материал легко снимает упрочняющее ионно-плазменное покрытие на основе нитридов и карбидов тугоплавких металлов (Ti, Zr, W и Mo) с режущего инструмента, вызывая его дальнейшее необратимое разрушение [1, 2].

В связи с этим, основной целью данной работы было синтезировать на поверхности лезвий ножей фирм Leitz, GUNDO комбинированным методом ионно-лучевого распыления (КИБ) синтезированной мишени, содержащей гальваническое Ni-ультрадисперсные алмазы (УДА) покрытие, и методом КИБ MoN покрытие и исследовать физико-механические свойства (структуру, фазовый и элементный состав, микротвердость, износостойкость) сформированных слоев.

Для формирования катодов-мишеней Ni-УДА использовали электролит матового никелирования следующего состава, г/дм³: NiSO₄·7H₂O – 220-250; NiCl₂·6H₂O – 35-40; H₃BO₃ – 30. Для получения блестящих никелевых покрытий, в электролит матового никелирования дополнительно вводили комплекс блескообразующих добавок Rado в количестве 1–5 мл/дм³ и сахарин в количестве 1–2 г/дм³. В качестве дисперсной фазы использовались ультрадисперсные алмазы (УДА) марки ВК (ТУ РБ 28619110001-95) [2].

Установлено, что при плотности тока 3 А/дм² и концентрации 10 мл/дм³ УДА получают более мелкокристаллические и плотноупакованные покрытия. Исследуемый электролит позволяет получать равномерные матовые и блестящие покрытия при температуре 50–55 °С со значениями микротвердости до 307 НВ и до 750 НВ. Созданы композиционные катоды-мишени на основе вольфрама, на поверхность которого электрохимическим способом осаждали трехслойное никелевое

покрытие: 5 мкм никеля из сульфатно-хлоридно-тарtratного электролита (40°C, плотность тока 4 А/дм²); 20 мкм покрытие Ni-УДА из сульфатно-хлоридного электролита матового никелирования (55°C, плотность тока 4 А/дм², УДА 6 мл/дм³); 10 мкм покрытие Ni-УДА толщиной из сульфатно-хлоридного электролита блестящего никелирования (55°C, плотность тока 2,5 А/дм², УДА 5 мл/дм³).

Для реализации процесса ионно-лучевого нанесения композиционных покрытий Ni-УДА (0,5 мкм) и Ni-УДА (0,5 мкм)/MoN (1,5 мкм) использовалось оборудование, состоящее из двухлучевого ионного источника ИРЛУ-2 и установки вакуумного напыления ННВ 6.6.И1, принцип действия которой основан на использовании метода КИБ.

Ионно-плазменное MoN покрытие осаждалось на поверхность ножей фрез методом КИБ в стандартных режимах. На первом этапе проводилась предварительная обработка ионами молибдена ножей фрез в вакууме 10⁻³ Па при отрицательном потенциале подложки -1 кВ. Затем покрытия наносились при токе горения дуги катода 180 А и опорном напряжении -120 В в атмосфере азота при давлении 10⁻¹ Па. Температура при осаждении соответствовала 700–800 °С. После осаждения MoN покрытия проводилась ионная очистка мишени, содержащей Ni-УДА, потоком ионов аргона при давлении аргона в вакуумной камере (3,0–3,5) 10⁻² Па в течение 25–30 мин. Ток соленоида составлял при этом 8 – 9 А. Напряжение на анод секции ионной очистки ионного источника составляло 4,0–4,5 кВ. Затем через распылительную секцию ионного источника был подан аргон до достижения в вакуумной камере установки давления (4,0–4,5) 10⁻² Па. Ток соленоида составлял 9,0–9,5 А. Напряжение на аноде распылительной секции ионного источника составляло 3,0–3,5 кВ. Очистка поверхности мишени производилась распылением ее материала на закрытую заслонку ионного источника до достижения стабильного режима работы распылительной секции ионного источника. Затем производилось нанесение Ni-УДА покрытия на поверхность MoN слоя основы. В результате формировалось композиционное Ni-УДА/MoN покрытие на поверхности ножа фрезы для металло- и деревообработки

Установлено, что при ионно-лучевом распылении синтезированной мишени, содержащей УДА, на MoN покрытие, сформированное методом КИБ на тведосплавной основе (3 вес. % Со, остальное WC), синтезировано комбинированное Ni-УДА/MoN покрытие, состоящее из отдельных фаз никеля α -Ni, нитрида молибдена с ГЦК решеткой γ -Mo₂N и наноалмазов (рисунок 1).

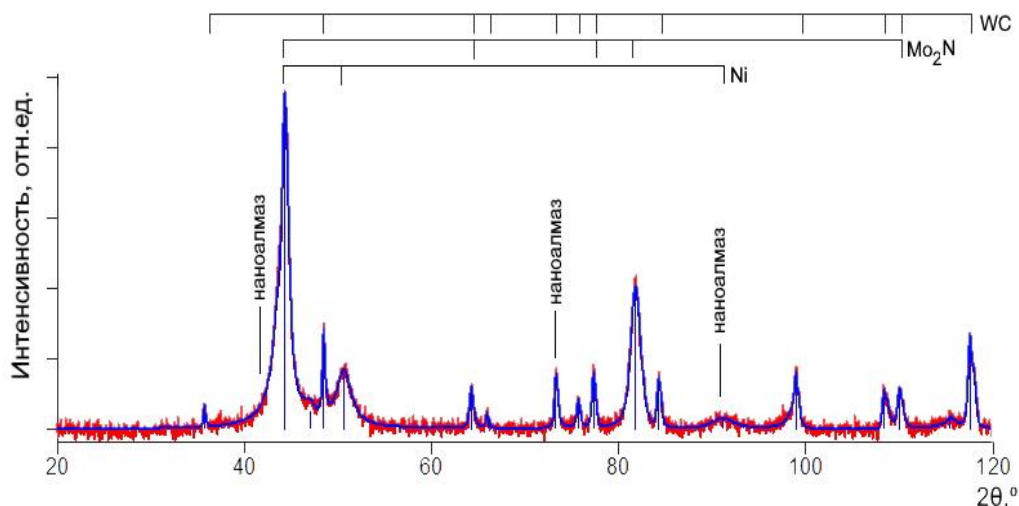


Рисунок 1 – Рентгенограмма Ni-УДА/MoN покрытия

РСА покрытия показывает, что фазы α -Ni и γ -Mo₂N имеют явно выраженные текстуры (111) и (200), соответственно. Сформированное комбинированное Ni-УДА/MoN покрытие имеет максимальное значение микротвердости 18 ± 1 ГПа при нагрузке 200 г.

Опытно-промышленные испытания на период стойкости модифицированных ножей концевой фрезы диаметром 21 мм при резании ламинированных деревостружечных плит (ДСтП) толщиной 15 мм проводили на ПУП «Мебельная фабрика «Пинскдрев-Адриана» на обрабатывающем центре с ЧПУ «VENTURE 113M» при следующих режимах: число ножей на фрезе – 1; частота вращения фрезы – 12000 мин⁻¹; скорость подачи – 4 м/мин, длина хода – 4 км. Пиломатериал ДСтП толщиной 30 мм был разрезан на заготовки размером: толщина – 25 мм, ширина – 100 мм, длина – 750 мм. Критерием потери режущей способности ножа являлось появление сколов отделки плиты.

Установлено, что период стойкости фрезерного инструмента, модифицированного Ni-УДА/MoN покрытиями, увеличивается при обработке деревостружечных плит в 1,7–1,8 раза, что подтверждено результатами опытно-промышленных испытаний на ПУП «Мебельная фабрика «Пинскдрев-Адриана».

Структура и элементный состав сформированных покрытий после испытаний исследовали с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с использованием электронного микроскопа Hitachi S-4800.

РСМА и СЭМ исследования изменения элементного состава лезвия ножей до и после резания ДСтП показали, что в процессе износа происходит значительное окисление лезвия ножа (Рисунок 2).

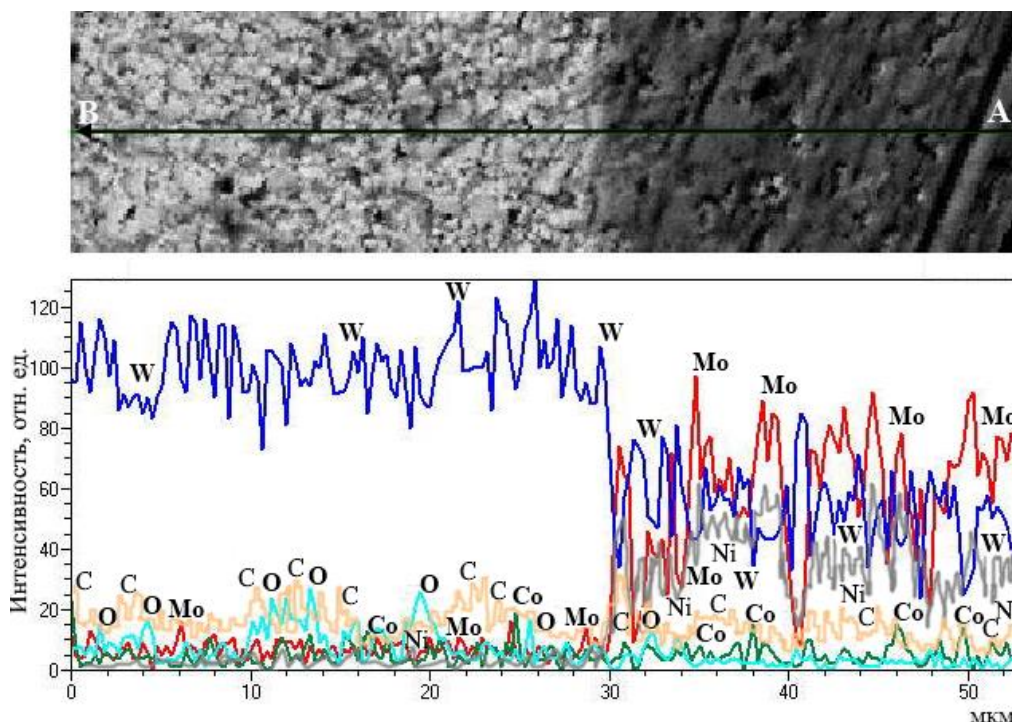


Рисунок 2 – СЭМ-изображение изношенного лезвия твердосплавного ножа с покрытием Ni-УДА/MoN после резания ламинированной ДСтП и распределение интенсивностей характеристического рентгеновского излучения элементов (Mo, W, Co, O, Ni, C) при сканировании вдоль линии АВ

После испытаний изношенное лезвие содержит до 14 ат.% кислорода, незначительное количество молибдена, содержание никеля не наблюдается. Истирание Ni-УДА/MoN покрытия на лезвии ножа связано, по-видимому, с присутствием Ni-УДА слоя в комбинированном покрытии, что, вероятно, вызывает снижение коэффициента трения покрытия при износе и последующего его деформационного втирания в лезвие в область его контакта с обрабатываемым материалом.

ЛИТЕРАТУРА

1 Долматов, В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и применение / В. Ю. Долматов // Успехи химии, 2001. – Т. 70, № 7. – С. 687–708.

2 Жилинский, В. В. Исследование структуры и свойств дуплексных Ni-DNA/Ni-покрытий на твердом сплаве / В. В. Жилинский, В. В. Чаевский, А. А. Касач, Т. Н. Филипович // Современные электрохимические технологии и оборудование: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–17 мая 2019 г. – Минск: БГТУ, 2019. – С. 103–107.

Е. К. Юхно, ассист., канд. хим. наук;
Г. С. Петров, доц., канд. хим. наук;
Н. С. Красуцкая, ассист. (БГТУ, г. Минск)

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ИНДАТА ЛАНТАНА

При рассмотрении магнитных свойств материалов обычно учитывают только вклады ферро- или парамагнитных ионов. Вкладом же диамагнитных ионов обычно пренебрегают. Но для магниторазбавленных материалов, содержащих небольшие количества, например, парамагнитных частиц, можно ожидать, что вклад диамагнетизма может оказаться сопоставимым со вкладом парамагнитных частиц и даже превышать его (особенно при низких температурах). Известны только единичные случаи экспериментальной проверки данного предположения.

В настоящей работе проведен синтез и исследованы магнитные свойства ряда твердых растворов на основе индата лантана типа $La_{1-x}Ln_xInO_3$ (где $Ln = Pr, Sm, Eu$) с невысокой степенью замещения диамагнитных ионов лантана парамагнитными ионами соответствующих ионов редкоземельных элементов ($x = 0,001-0,1$). Данные твердые растворы интенсивно исследуются в настоящее время вследствие наличия у них интересных люминесцентных свойств.

Синтез образцов проводили керамическим твердофазным методом из соответствующих оксидов высокой чистоты. Оксиды лантана и редкоземельных элементов предварительно прокаливали на воздухе при температуре 1273 К.

Магнитные свойства (удельную магнитную восприимчивость $\sigma_{уд}$) изучали при температурах от 5 до 50 К в магнитных полях до 14 Тл вибрационным методом на универсальной высокополевой измерительной системе (Cryogenic Ltd, Великобритания, 4IS) в ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению». На основании полученных данных сделана попытка сопоставления величин вкладов диа- и парамагнитных ионов в магнитные свойства исследованных образцов.

Некоторые результаты исследования приведены на рис. 1. Как видно, намагниченность большинства исследованных твердых растворов при увеличении напряженности магнитного поля до 14 Тл (рис. 1) увеличивается нелинейно с постепенным подходом к магнитному насыщению, которое, однако, не достигается в поле напряженностью до 14 Тл.

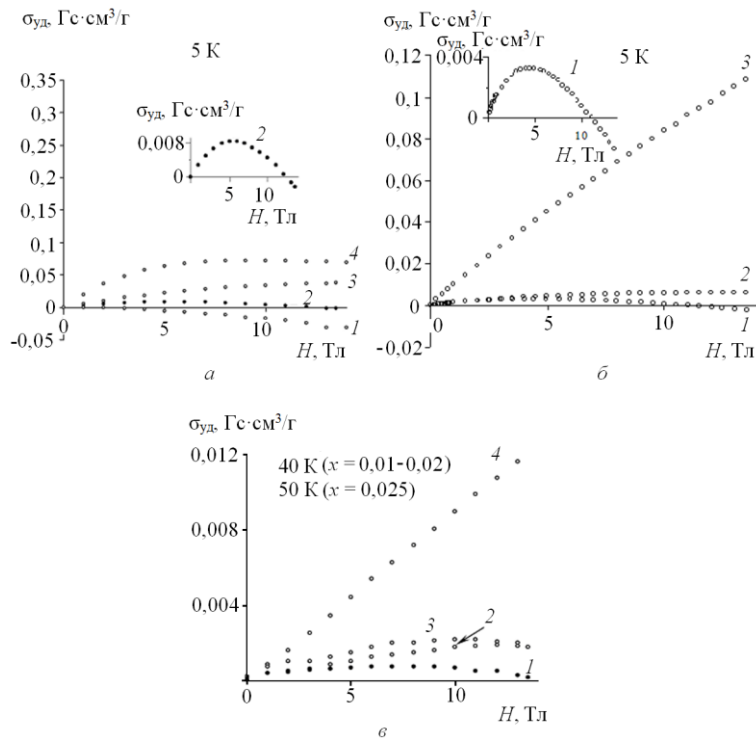


Рисунок 1 – Полевые зависимости удельной намагниченности $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ (а) ($x = 0$ (1); 0,001 (2); 0,003 (3); 0,004 (4)); $\text{La}_{1-x}\text{Eu}_x\text{InO}_3$ (б) ($x = 0,005$ (1); 0,01 (2); 0,1 (3)); $\text{La}_{1-x}\text{Sm}_x\text{InO}_3$ (в) ($x = 0,010$ (1); 0,015 (2); 0,020 (3); 0,025 (4))

Как видно, намагниченность большинства исследованных твердых растворов при увеличении напряженности магнитного поля до 14 Тл (рис. 1) увеличивается нелинейно с постепенным подходом к магнитному насыщению, которое, однако, не достигается в поле напряженностью до 14 Тл. Показано, что при 5 К для твердых растворов $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$ (рис. 1а, вставка) и $\text{La}_{0,995}\text{Eu}_{0,005}\text{InO}_3$ (рис. 1б, вставка) увеличение напряженности магнитного поля до 5 Тл приводит к постепенному возрастанию парамагнитной удельной намагниченности. При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля происходит постепенное снижение величины удельной намагниченности, которая затем переходит в отрицательную (диамагнитную) область (см. рис. 1а и 1б). Это обусловлено тем, что диамагнитный вклад в намагниченность этих твердых растворов становится больше парамагнитного вклада, и в магнитных полях более 11 Тл она определяется диамагнитным вкладом. Удельная намагниченность при 5 К и 40–50К остальных твердых растворов на основе индата лантана является положительной в магнитных полях до 14 Тл. Нелегированный LaInO_3 является диамагнитным в магнитных полях до 14 Тл (рис. 1а, кривая 1).

Таким образом, результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что в случае разбавленных магнитных материалов диамагнитный вклад в намагниченность образцов действительно может преобладать над парамагнитным вкладом.

Е. О. Богдан, доц., канд. техн. наук;
Ю. Г. Павлюкевич, доц., канд. техн. наук;
А. А. Черник, доц., канд. хим. наук;
Н.Н. Гундилович, ассист., канд. техн. наук; П.С. Ларионов, асп.
(БГТУ, г. Минск)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

На ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в процессе выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах образуются различные отходы, в том числе и пыль, улавливаемая фильтрами в процессе очистки газов, отходящих от сталеплавильных печей (далее пыль ПГУ). Поскольку процессы сталеплавильного производства протекают при высоких температурах, цинк, железо и другие элементы, присутствующие в шихте, переходят в газовую фазу и далее накапливаются в аппаратах системы газоочистки.

Разработка и применение эффективных технологий по утилизации накопленных на территориях предприятий отходов относятся к важнейшим задачам металлургии, а научные исследования, направленные на разработку технологий по переработке и утилизации отходов сталеплавильного производства, весьма актуальны.

Целью настоящей работы явилось комплексное исследование физико-химических свойств пыли ПГУ и установление основных направлений ее переработки.

Исследуемая пыль ПГУ представляет собой высокодисперсный полифракционный порошок. Насыпная плотность пыли ПГУ 597,6–734,6 кг/м³. Цвет образцов пыли, определенный визуально по шкале 1000-цветного атласа ВНИИ им. Д.И. Менделеева, зеленовато-коричневый.

Химический состав образцов пыли определялся на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре Asios (PANalytical, Нидерланды). Установлено, что химический состав пробы пыли ПГУ представлен соединениями различных химических элементов, причем преобладающими являются Fe, Zn, Ca. Их содержание в пересчете на оксиды составляет Fe₂O₃ – 33,0–36,5 мас. %; ZnO – 27,1–30,1 мас. %; CaO – 6,16–10,2 мас. %.

Фазовый состав исследуемых образцов пыли, определенный с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker, представлен преимущественно кристаллическими фазами магнетита (FeO·Fe₂O₃), феррита (α-Fe), франклинита (ZnO·Fe₂O₃), мелантерита

($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), вюстита (FeO), сидерита (FeCO_3), вульфингита ($\text{Zn}(\text{OH})_2$), лавренсита (FeCl_2), кальцита (CaCO_3), магнезита (MgCO_3) и смитсонита (ZnCO_3).

Микроструктура образцов пыли ПГУ, исследованная с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV, представлена отдельными частицами и их агломератами. Текстура – однородная, форма частиц – преимущественно изометрическая.

Исследование гранулометрического состава пыли проводилось на лазерном анализаторе размеров частиц «HORIBA LA-950». Установлено, что исследуемая пыль ПГУ является полидисперсной с размером частиц 0,34–150,38 мкм, причем содержание фракции 1–10 мкм составляет около 64 мас. %.

На основе проведенных исследований физико-химических свойств пыли ПГУ разработаны основные направления ее использования и переработки. Одним из направлений утилизации пыли ПГУ является ее использование в качестве сырьевого компонента при получении материалов строительного назначения: клинкерного кирпича, объемно окрашенного и ангобированного керамического лицевого.

На кафедре технологии стекла и керамики БГТУ проведены исследования возможности получения клинкерного кирпича на основе тугоплавкой глины Городное, суглинков Фаниполь, легкоплавкой глины Кустиха или Гайдуковка, гранитоидных отсеков и пыли ПГУ в количестве 5–15 %.

Образцы, обожженные при температуре 1100 °С, по физико-химическим характеристикам в соответствии с требованиями СТБ 1787-2007 могут быть отнесены к клинкерному кирпичу класса А (выдержка при максимальной температуре 1–2 ч) и класса Б (выдержка при максимальной температуре 3 ч).

Учитывая высокое содержание соединений цинка в составе пыли, что в пересчете на оксиды составляет около 27,1–30,1 %, перспективным методом представляется гидрометаллургическое извлечение цинка. Гидрометаллургические методы основаны на растворении соединений цинка в растворах кислот, щелочей с последующим его извлечением, например, в виде цинкового порошка. Кроме того, при обработке растворов выщелачивания щелочами и H_3PO_4 возможно получение оксида цинка ZnO (после термообработки образовавшегося $\text{Zn}(\text{OH})_2$) или фосфата цинка $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$, которые могут применяться в качестве пигментов, в том числе и антикоррозионных. При дальнейшей химической обработке осадка $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ возможно получение гидро- и дигидрофосфатов цинка, которые широко используются в сельском хозяйстве в качестве микроудобрений.

Исследования, проведенные на кафедре химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники БГТУ показали принципиальную возможность применения электроэкстракции для извлечения цинка из пыли ПГУ в виде металла.

Образцы пыли ПГУ подвергались выщелачиванию в растворах серной кислоты и гидроксида натрия. Затем растворы выщелачивания подвергали электролизу с нерастворимыми анодами – графитами и нержавеющей сталью для кислого и щелочного электролита соответственно. В качестве материала катода использовалась медь, нержавеющая сталь, а также катоды с высокой удельной поверхностью из пеноникеля.

Полученные данные по удельному расходу электрической энергии 6200–10300 кВт·ч/т показывают, что этот показатель сопоставим с таковым для процесса электроэкстракции цинка из руды. Учитывая высокие объемы образования пыли ПГУ, а также достаточно высокую и постоянно растущую стоимость цинка на мировом рынке (2813 \$/т), электроэкстракция цинка может быть рассмотрена как перспективный способ переработки исследуемого отхода.

После выщелачивания цинка из пыли ПГУ, образуется железосодержащий продукт, содержащий преимущественно соединения железа, а также другие химические соединения в качестве примесей, присутствовавшие изначально в составе перерабатываемой пыли. Железосодержащий продукт может в дальнейшем применяться при получении объемно окрашенного и ангобированного керамического кирпича, а также бетонных тротуарных плит.

Еще одним из направлений переработки пыли ПГУ является ее использование в качестве наполнителя при получении лакокрасочных материалов (ЛКМ). Наполнителями лакокрасочных материалов являются высокодисперсные неорганические вещества, в качестве которых как правило используют природные минералы: кальцит, мел, доломит, каолин, тальк, слюда, барит, кварц и другие. Наполнители вводят в краски и грунтовки в количестве 25–100 % от массы пигментов.

Проведенные исследования позволили установить, что предварительно термообработанная при 1000 °С пыль ПГУ может использоваться в качестве пигмента или активного наполнителя при получении лакокрасочных материалов. Например, алкидная грунтовка, полученная с использованием пыли ПГУ, характеризуется повышенными значениями твердости, прочности при ударе и адгезии к металлическим и деревянным поверхностям.

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИКИ НА ОСНОВЕ
ПРОИЗВОДНЫХ СЛОИСТОГО КОБАЛЬТИТА НАТРИЯ**

Слоистые кобальтиты натрия Na_xCoO_2 характеризуются высокими значениями фактора мощности (P) и показателя термоэлектрической добротности (ZT), что позволяет рассматривать его как возможную основу для разработки материалов для p -ветвей высокотемпературных термоэлектрических устройств различного назначения. Физико-химические и функциональные характеристики керамики на основе кобальтита натрия могут быть улучшены путем варьирования ее катионного состава, в связи с чем изучение твердых растворов на основе Na_xCoO_2 представляет значительный интерес, в том числе для термоэлектрического материаловедения.

Керамические образцы состава $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ ($\text{Me} = \text{Cr}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{W}, \text{Bi}$) получали твердофазным методом в интервале температур 1183–1233 К. Согласно результатам РФА, керамика состава $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ имела гексагональную структуру, соответствующую структуре γ - Na_xCoO_2 . На дифрактограммах порошков состава наблюдали рефлексы примесной фазы Co_3O_4 , которая образуется при частичной деградации поверхности частиц порошка вследствие их взаимодействия с атмосферными CO_2 и влагой.

Кажущаяся плотность керамики изменялась в пределах 2,81–3,93 г/см³, уменьшаясь при замещении ионов кобальта ионами $3d$ -металлов (Cr, Ni) и возрастая при замещении ионов кобальта ионами $4d$ - (Mo), $5d$ - (W) и $6p$ -металлов (Bi). Значения пористости образцов были выше, чем для базового кобальтита $\text{Na}_{0,55}\text{CoO}_2$ (исключение $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{W}_{0,10}\text{O}_2$). Зерна керамики $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ были анизометрическими, представляя собой пластины толщиной 0,5–3 мкм и шириной 5–15 мкм, форма которых была близка к шестиугольной. Размеры кристаллитов кобальтитов $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ изменялись в пределах 50–70 нм, а зерна керамики были поликристаллическими и содержали порядка 10^6 – 10^7 кристаллитов каждое.

Температурные зависимости относительного удлинения $\Delta l/l_0 = f(T)$ изученных образцов в интервале температур 300–1100 К были линейными, а величина ТКЛР твердых растворов $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ изменялись в пределах $(12,5$ – $16,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и была больше, чем для незамещенного кобальтита натрия $\text{Na}_{0,55}\text{CoO}_2$ ($12,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), что обусловлено ро-

стом степени ангармонизма металл–кислородных колебаний при частичном замещении кобальта другими металлами.

Электропроводность $\text{Na}_{0,55}\text{CoO}_2$ и $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ носила металлический характер ($\partial\sigma/\partial T < 0$), который при высоких температурах ($T > 700\text{--}800\text{ K}$) изменялся на полупроводниковый ($\partial\sigma/\partial T < 0$) (исключением являлся никельсодержащий твердый раствор, проводимость которого во всем исследованном интервале температур носила полупроводниковый характер); при этом величина электропроводности образцов, в целом, уменьшалась при увеличении степени окисления замещающего кобальт металла в $\text{Na}_{0,55}\text{CoO}_2$.

Положительный знак коэффициента термо-ЭДС ($S > 0$) кобальтитов $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ указывает на то, что эти материалы являются проводниками p -типа, т.е. основными носителями заряда в них являются «дырки». Величина коэффициента термо-ЭДС кобальтитов возрастала при увеличении температуры и степени окисления замещающего кобальт металла.

Значения фактора мощности спеченной керамики $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{CoO}_2$ увеличивались с ростом температуры и немонотонно изменялись при изменении природы замещающего кобальт металла, достигая наибольших значений для твердых растворов $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{V}_{0,10}\text{O}_2$, $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Cr}_{0,10}\text{O}_2$ и $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{W}_{0,10}\text{O}_2$ – 1018, 917 и 872 мкВт/(м·К²) соответственно, что в ~ 5 раз больше, чем для незамещенного кобальтита натрия $\text{Na}_{0,55}\text{CoO}_2$.

Значения теплопроводности исследованной керамики в области температур 300–1100 К изменялись в пределах 0,78–1,98 Вт/(м·К), несколько возрастая при частичном замещении кобальта никелем и хромом и уменьшаясь при частичном замещении кобальта вольфрамом.

При увеличении температуры λ фаз $\text{Na}_{0,55}\text{CoO}_2$ и $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ ($\text{Me} = \text{Ni}, \text{W}, \text{Vi}$) уменьшалась, $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Cr}_{0,10}\text{O}_2$ – практически не изменялась. Электронная составляющая теплопроводности исследованных кобальтитов была невелика ($\lambda_{\text{эл}}/\lambda \approx 0,01\text{--}0,06$) и увеличивалась с ростом температуры. Таким образом, за счет колебаний решетки (фононов) переносится практически все тепло в фазах $\text{Na}_{0,55}\text{CoO}_2$ и $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ ($\text{Me} = \text{W}, \text{Vi}$) ($\lambda_{\text{реш}} \approx \lambda$), и его большая часть – в твердых растворах $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{Me}_{0,10}\text{O}_2$ ($\text{Me} = \text{Cr}, \text{Ni}$) ($\lambda_{\text{реш}} \approx (0,94\text{--}0,99)\lambda$).

Величина безразмерного показателя добротности керамики увеличивалась с ростом температуры и была наибольшей для керамики состава $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,90}\text{W}_{0,10}\text{O}_2$ – 1,23 при 1100 К, что в 5,3 раза больше, чем для незамещенного кобальтита натрия при той же температуре (0,23).

Д. В. Зиневич, студ.; К. В. Поддубская, студ.;
А. А. Глинская, канд. хим. наук, ст. преп.;
И. А. Великанова, канд. хим. наук, доц.;
Г. П. Дудчик, канд. хим. наук, доц. (БГТУ, г. Минск)

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ФЕРРИТА ВИСМУТА, ЧАСТИЧНО ЗАМЕЩЕННЫХ КАТИОНАМИ ЛАНТАНА И ПРАЗЕОДИМА

В последние несколько десятилетий проводятся активные исследования различных свойств мультиферроиков, или сегнетомагнетиков, которые могут найти широкое применение при разработке материалов для электронной и химической промышленности, в приборостроении, в том числе в сенсорной технике, спинтронике, в устройствах хранения и передачи информации. Одним из наиболее перспективных соединений для разработки новых сегнетомагнитных материалов является феррит висмута BiFeO_3 со структурой перовскита, который имеет высокие значения температуры Нееля ($T_N = 643 \text{ K}$) и сегнетоэлектрической температуры Кюри ($T_C = 1083 \text{ K}$) и дает возможность создания новых материалов с высокими значениями электрической поляризации и намагниченности при комнатной температуре [1]. Многочисленные исследования феррита BiFeO_3 показали, что перспективным путем улучшения его сегнетомагнитных свойств является направленный синтез твердых растворов, в которых катионы висмута частично замещены катионами редкоземельных элементов. Однако синтез BiFeO_3 и твердых растворов на его основе путем взаимодействия соответствующих оксидов существенно осложняется рядом факторов, связанных с особенностями химических свойств оксида висмута, что не позволяет получать беспримесные твердые растворы методом спекания стехиометрических смесей оксидов. В связи с этим целями наших исследований являлись разработка нового твердофазного метода синтеза твердых растворов на основе BiFeO_3 со структурой перовскита с изовалентным замещением ионов Bi^{3+} ионами La^{3+} и Pr^{3+} без содержания посторонних примесей и исследование ряда их свойств.

В работе [2] методом твердофазных реакций впервые синтезированы твердые растворы на основе феррита висмута состава $\text{Bi}_{1-x}\text{Ln}_x\text{FeO}_3$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Pr}; x = 0,05; 0,1$) с использованием прекурсоров – твердых растворов ферритов состава $\text{Bi}_{2-x}\text{Ln}_x\text{Fe}_4\text{O}_9$ ($x = 0,2; 0,4$) и оксида висмута Bi_2O_3 . Были определены оптимальные температуры и время обжига, при которых синтезированные образцы являлись одно-

фазными и не содержали примесных фаз – муллита $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ и силленита $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$. Установлено, что разработанный нами метод является наиболее оптимальным способом получения однофазных образцов твердых растворов составов $\text{Bi}_{0,95}\text{La}_{0,05}\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{0,9}\text{La}_{0,1}\text{FeO}_3$ и $\text{Bi}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{FeO}_3$, имеющих структуру ромбоэдрически искаженного перовскита.

В работах [2–3] путем рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопического исследования полученных образцов твердых растворов представлены результаты идентификации предварительно синтезированных образцов прекурсоров и конечных продуктов синтеза, проведены измерения их удельной электропроводности при температурах от 470 до 1090 К, рассчитаны значения энергии активации электропроводности в интервале температур 360–520 и 700–1000 К. Рассчитаны параметры кристаллических решеток твердых растворов, которые хорошо согласуются с литературными данными для базового сегнетомагнетика – феррита висмута BiFeO_3 [3].

В настоящей работе были впервые исследованы диэлектрические свойства твердого раствора состава $\text{Bi}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{FeO}_3$. Одним из важных свойств диэлектрика является способность рассеивать энергию в электрическом поле. Как известно, энергия, рассеиваемая в электроизоляционном материале под воздействием на него электрического поля, называется диэлектрическими потерями и обычно характеризуется углом диэлектрических потерь, а также тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Для измерений диэлектрических свойств $\text{Bi}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{FeO}_3$ использовалась методика, описанная в [4].

На основании полученных данных были вычислены значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в зависимости от температуры, которые представлены на рисунках 1а и 1б соответственно.

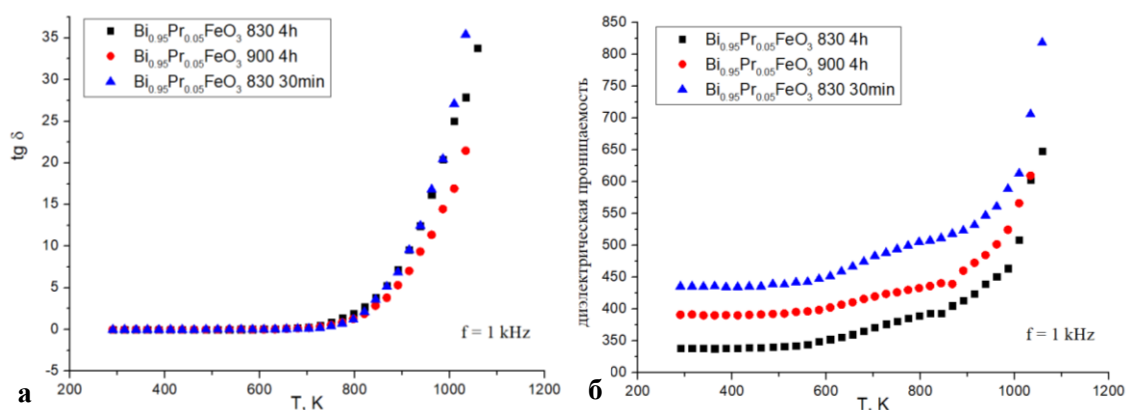


Рисунок 1 – Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ (а) и диэлектрической проницаемости (б) для образцов $\text{Bi}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{FeO}_3$, синтезированных при различных условиях

На температурной зависимости диэлектрической проницаемости наблюдаются размытые максимумы (рисунок 1б) в области температур 650 – 800 К, близкой к температуре Нееля, соответствующей переходу из антиферромагнитного состояния в парамагнитное. Эти максимумы обусловлены, вероятно, наличием в образцах дефектов, таких, например, как вакансии висмута и кислорода, и связаны с высокой летучестью оксида висмута. Возрастание диэлектрических потерь исследованных образцов с ростом температуры коррелирует с ростом значений их электропроводности [3]. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках теоретически можно объяснить как результат процессов, обусловленных главным образом примесями и нарушениями однородности диэлектрика. При этом зависимости $\text{tg } \delta = f(T)$ (рис. 1а) для исследованных образцов отличаются незначительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пятаков А. П., Звездин, А. К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 6. С. 593–620.
2. Башкиров Л. А., Глинская А. А., Великанова И. А., Дудчик Г. П. Синтез новых мультиферроиков на основе феррита висмута BiFeO_3 со структурой перовскита с использованием в качестве прекурсоров ферритов висмута других структур // Труды БГТУ. 2017. Сер. 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. № 2. С. 42–48.
3. Башкиров Л. А., Дудчик Г. П., Глинская А. А., Великанова И. А. Синтез и исследование свойств новых твердых растворов на основе феррита висмута BiFeO_3 // Свиридовские чтения : сб. ст. Минск, 2019. Вып. 15. С. 19–31.
4. Затюпо А. А. Физико-химические свойства твердых растворов на основе феррита висмута и кобальтитов, галлатов лантана, самария со структурой перовскита: дис...канд. хим. наук: 02.00.21, 02.00.04. Минск, 2013. 190 с.

УДК 537.31/.32+54–165.2

Я.Ю. Журавлева, магистрант; А.И. Клындюк, доц., канд. хим. наук;
Е.А. Чижова, доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Nd}(\text{Ba},\text{Sr})(\text{Fe},\text{Co},\text{Cu})_2\text{O}_{5+\delta}$

Кислороддефицитные слоистые перовскиты (КСП) типа $\text{LnBa}(\text{Me}',\text{Me}'',\text{Me}''')_2\text{O}_{5+\delta}$ ($\text{Ln} = \text{Y}$, редкоземельный элемент (РЗЭ), Me' , Me'' , $\text{Me}''' = \text{Mn}$, Fe , Co , Ni , Cu) обладают уникальными электротранспортными свойствами и содержат в своей структуре т. н. «слабосвязанный» кислород, благодаря чему находят широкое применение в качестве функциональных материалов различного назначения: электродов для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) [1], полупроводниковых химических сенсоров газов [2], катализаторов окисления углеводородов [3], высокотемпературных термоэлектриков [4]. Функциональные характеристики КСП могут быть улучшены путем их допирования оксидами различных металлов либо модифицирования наночастицами различной природы [5].

В данной работе изучено влияние частичного замещения бария стронцием и кобальта медью в $\text{NdBaFeCoO}_{5+\delta}$ на кристаллическую структуру, термическую стабильность и электротранспортные свойства твердых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Cu}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$ ($x = 0,02; 0,05; 0,10; 0,20$).

Образцы были получены методом твердофазных реакций из Nd_2O_3 (НО-Л), BaCO_3 (ч.), SrCO_3 (ч.), Fe_2O_3 (ос.ч.), CuO (ч.д.а.), Co_3O_4 (ч.), которые в стехиометрических соотношениях смешивали в мельнице Pulverizette 6.0 фирмы Fritsch (300 об/мин, 1 ч) в среде этанола, прессовали и отжигали на воздухе в течение 40 ч при 900°C ; затем подвергали измельчению, повторному помолу и прессованию в формы параллелепипедов размером $5 \times 5 \times 30$ мм, после чего спекали на воздухе при температурах 950°C ($x = 0,02$ и $0,05$), 975°C ($x = 0,1$) и 1000°C ($x = 0,2$) в течение 9 часов, а затем дополнительно при 1000°C в течение 9 часов.

Идентификацию образцов и определение параметров их кристаллической структуры осуществляли при помощи рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр Bruker D8 XRD Advance, CuK_α -излучение) и ИК-спектроскопии поглощения (ИК-Фурье спектрометр NEXUS E.S.P.). Термическую стабильность порошков КСП изучали на воздухе при помощи термоаналитической системы TGA/DSC-1/1600 HF

(5°C/мин, 25–825°C). Электропроводность и термо-ЭДС спеченной керамики исследовали на воздухе в интервале температур 25–820°C по методикам, описанным в [4, 5].

По данным РФА полученные образцы были однофазными и имели характерную для слоистых перовскитов тетрагональную структуру (пр. гр. симм. $P4/mmm$). Параметры элементарной ячейки твердых растворов изменялись в пределах $a = 3,903\text{--}3,914 \text{ \AA}$, $c = 7,707\text{--}7,715 \text{ \AA}$ и уменьшались с ростом x . Кажущаяся плотность образцов, определенная по их массе и геометрическим размерам, изменялась в пределах $4,84\text{--}5,62 \text{ г/см}^3$, уменьшаясь с ростом степени замещения бария стронцием. Относительная плотность составила 73–84%.

Таблица 1 – Параметры кристаллической структуры (a , c , V), степень тетрагонального искажения ($c/2a$), рентгенографическая (ρ_{xrd}) и кажущаяся ($\rho_{каж}$) плотность твердых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Cu}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$

x	$a, \text{ \AA}$	$c, \text{ \AA}$	$V, \text{ \AA}^3$	$c/2a$	$\rho_{xrd}, \text{ г/см}^3$	$\rho_{каж}, \text{ г/см}^3$
0,02	$3,913 \pm 0,001$	$7,715 \pm 0,001$	$118,1 \pm 0,057$	0,9860	6,72	5,54
0,05	$3,914 \pm 0,001$	$7,711 \pm 0,001$	$118,1 \pm 0,049$	0,9851	6,70	5,62
0,10	$3,911 \pm 0,002$	$7,707 \pm 0,002$	$117,9 \pm 0,057$	0,9853	6,67	5,54
0,20	$3,903 \pm 0,001$	$7,708 \pm 0,001$	$117,5 \pm 0,049$	0,9876	6,63	4,84

Согласно результатам термического анализа, порошки синтезированных в работе КСП были термически стабильны до температур 340–380°C, выше которых наблюдалось незначительное (0,25–0,75% в интервале температур 340–825°C) уменьшение массы образцов, связанное с выделением «слабосвязанного» кислорода из кристаллической структуры образцов в окружающую среду. Температура начала потери массы образцами уменьшалась с ростом x , из чего следует, что термическая стабильность твердых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Cu}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$ снижается при частичном замещении в них бария стронцием.

Электропроводность материалов вблизи комнатной температуры носила полупроводниковый ($\partial\sigma/\partial T > 0$), а при повышенных температурах металлический ($\partial\sigma/\partial T < 0$) характер, проходя через максимум вблизи 437–462°C и возрастая с ростом замещения бария стронцием. Значения коэффициента термо-ЭДС керамики в исследованном интервале температур были положительными. На температурной зависимости коэффициента термо-ЭДС вблизи 380–480°C наблюдался минимум, положение которого смещалось в сторону меньших температур с ростом x . Наличие экстремумов на приведенных зависимостях обусловлено выделением из образцов «слабосвязанного» кислорода. Величина кажущейся энергии активации проводимости (E_σ), рассчитанная из линейных

участков зависимостей $\ln(\sigma \cdot T) = f(1/T)$, составила 0,167–0,203 эВ (табл. 2). Энергия активации носителей заряда (E_S), рассчитанная из линейных участков зависимостей $S = f(1/T)$, составила 0,038–0,054 эВ. Энергию активации миграции носителей заряда рассчитывали как $E_m = E_\sigma - E_S$. Как видно из приведенных в табл. 2 данных, частичное замещение бария стронцием, в целом, приводит к уменьшению энергозатрат при электропереносе в изученных КСП.

Таблица 2 – Электротранспортные свойства твердых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Cu}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$

x	σ_{\max} , См/см	S_{\min} , мкВ/К	E_m , эВ	E_σ , эВ	E_S , эВ
0,02	98,3	32,1	0,143	0,190	0,047
0,05	110,7	30,8	0,159	0,203	0,044
0,10	111,6	37,8	0,146	0,200	0,054
0,20	111,6	23,9	0,129	0,167	0,038

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» (подпрограмма «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения»).

ЛИТЕРАТУРА

1. $\text{YBa}(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Cu})_2\text{O}_{5+\delta}$ Cathode Materials for Solid Oxide Fuel Cells / A.I. Klyndyuk [et al.] // Физическая химия и электрохимия расплавленных и твердых электролитов: сб. науч. трудов. – Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур». – 2020. – С. 171–174.
2. Чиждова, Е.А. Газочувствительные свойства слоистых феррокупратов лантана (иттрия) – бария / Е.А. Чиждова, С.В. Шевченко, А.И. Клындюк // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2019. – № 2. – С. 146–154.
3. Сенсорные и каталитические свойства твердых растворов на основе YBaCuFeO_5 / Е.А. Чиждова [и др.] // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: мат. Межд. науч.-техн. конф., 26–28 ноября 2003 г., г. Минск. – Мн.: БГТУ. – 2003. – С. 317–319.
4. Клындюк, А.И. Термоэлектрические свойства слоистых феррокупратов $\text{LnBaCuFeO}_{5+\delta}$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd-Lu}$) / А.И. Клындюк // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып. 2. – С. 237–241.
5. Чиждова, Е.А. Электротранспортные свойства нанокompозитов $\text{NdBaCoFeO}_{6-\delta}$ /УНТ / Е.А. Чиждова, Я.Ю. Журавлева // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 62–68.

Е.А. Чижова, доц., канд. хим. наук;
Р.С. Латыпов, студ.; И.Д. Сидорик, студ.;
С.В. Шевченко, ст. преп., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} / \text{Cu}$, $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} / \text{Cu}_2\text{O}$

Слоистый кобальтит кальция $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ является перспективной основой для создания *p*-ветвей термоэлектрических генераторов, в которых «потерянная» теплота преобразуется в электрическую энергию. Недостатком керамики на основе слоистого кобальтита кальция является их пониженная по сравнению с монокристаллами электропроводность, для повышения которой используют частичное замещение ионов кальция и кобальта в его структуре [1], применение специальных методов спекания, позволяющих получить более плотную керамику (спекание под давлением, искровое плазменное спекание и т.д.) [2, 3], а также направленное создание в керамике фазовой и химической неоднородности [2, 4]. Эффективным способом управления физико-химическими и функциональными свойствами керамики на основе $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ является введение в нее микро- и наночастиц благородных металлов (Ag, Au) [4]. Данный подход представляется весьма продуктивным для разработки термоэлектрической керамики с улучшенными функциональными характеристиками, однако использование при ее синтезе благородных металлов и их соединений приводит к существенному удорожанию образующихся при этом материалов. В связи с этим интересным является выяснение возможности повышения электропроводности и, как следствие, термоэлектрических показателей керамики на основе $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ путем введения в нее частиц переходных металлов (и их оксидов), стоимость которых значительно ниже, чем благородных металлов.

В данной работе с целью разработки новых эффективных высокотемпературных термоэлектриков изучено влияние добавки частиц меди и ее оксида в сочетании с двухстадийным спеканием на плотность, электротранспортные (электропроводность, коэффициент термо-ЭДС) и функциональные (фактор мощности) свойства керамики на основе слоистого кобальтита кальция.

Исходный слоистый кобальтит кальция $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ синтезировали керамическим методом из CaCO_3 (ч.д.а.) и Co_3O_4 (ч.д.а) при температуре 1173 К на воздухе в течение 12 ч. После обжига керамику измельчили и подвергли повторному помолу, а затем к готовому порошку кобальтита кальция добавили 3, 6, 9 мас. % Cu или Cu_2O . После помола и прессования образцы спекали на воздухе при температурах 1173 ($\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ + 9 мол.%

Cu_2O , $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} + x$ мол.% Cu) в течение 24 ч; 1273 К ($\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} + x$ мол.% Cu , $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} + 9$ мол.% Cu_2O), 1373 К ($\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} + 9$ мол.% Cu_2O) или 1473 К ($\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} + x$ мол.% Cu_2O) в течение 6 ч. Для восстановления ожидаемого в соответствии с диаграммой состояния [5] фазового состава керамики после спекания при температурах выше температуры перитектоидного распада (1199 К [5]) ее дополнительно отжигали на воздухе при 1173 К в течение 71 ч.

На дифрактограммах композитов $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} + x$ мол.% Cu (дифрактометр Bruker D8 XRD Advance, $\text{CuK}\alpha$ -излучение) наблюдались отчетливые рефлексы фазы $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ и слабовыраженные рефлексы примесных фаз, принадлежащих, вероятнее всего, меди и ее оксидам, образовавшимся в результате отжига образцов. Кажущаяся плотность керамики ($\rho_{\text{каж}}$), найденная по массе и геометрическим размерам образцов, варьировалась в пределах 2,99–4,14 г/см³ (таблица), снижаясь при добавлении оксида меди и увеличиваясь с ростом содержания в образцах металлической меди.

Удельная электропроводность (σ) всех образцов, измеренная на воздухе четырехконтактным методом перпендикулярно оси прессования была на 5–15 См/см выше, чем проводимость, измеренная параллельно оси прессования. Это связано с текстурированием образцов, выраженном в ориентации «чешуек» слоистого кобальтита кальция преимущественно перпендикулярно оси прессования. С ростом плотности образцов удельная электропроводность, как правило, повышалась (таблица). Наибольшее значение удельной электропроводности наблюдалось для керамики, содержащей 3 мас.% меди, спеченной при 1273 К. Снижение температуры спекания, рост содержания меди и добавление оксида меди приводило к снижению электропроводности как за счет снижения плотности образцов, так и за счет увеличения содержания в образцах низкопроводящих фаз. Энергия активации электропроводности, найденная из линейных участков зависимостей $\ln(\sigma \cdot T) = f(1/T)$, менялась в пределах 0,086–0,154 эВ и была заметно меньше для керамики, модифицированной частицами меди. Коэффициент термо-ЭДС (S) во всем изученном интервале температур для всех образцов был положительным, т.е. изученные материалы являлись полупроводниками p -типа.

Наибольшее значение фактора мощности (P), рассчитанного по формуле $P = S^2 \cdot \sigma$, наблюдали для $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} + 3$ мас.% Cu , спеченного при 1273 К, в направлении, перпендикулярном оси прессования, он составил 335 мкВт/(м·К²) при 1100 К, что в 3,4 раза превышает фактор мощности керамики $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$, получаемой обычным твердофазным способом ($P_{1100} = 100$ мкВт/(м·К²)) [1], и несколько уступает таковому

для композита $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ +2 мас.% Cu, полученного методом горячего прессования [3].

Таблица – Электротранспортные и термоэлектрические характеристики керамики состава $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ + x мас.% Cu (Cu_2O), спеченной при различных температурах (T)

Cu/Cu ₂ O	x	T , К	$\rho_{\text{каж}}$, Г/см ³	σ_{1100} , См/см	E_A , эВ	S_{1100} , мкВ/К	P_{1100} , мкВт/(м·К ²)
Cu	3	1173	3,03	45,6	0,094	179	146
	6		3,20	54,6	0,086	186	189
	9		3,39	52,7	0,103	175	161
	3	1273	3,81	82,2	0,098	202	335
	6		4,14	41,1	0,095	188	145
	9		3,86	53,1	0,096	175	163
Cu ₂ O	9	1173	3,31	18,9	0,102	–	–
	9	1273	3,30	41,1	0,122	198	161
	9	1373	3,63	36,2	0,154	196	140
	3	1473	3,67	38,9	0,102	–	–
	6		2,99	40,0	0,140	–	–
	9		3,01	38,9	0,111	164	104

Работа выполнена в рамках подпрограммы «Материаловедение и технологии материалов» ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (задание 1.55).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Клындюк, А.И. Синтез, структура и свойства слоистых термоэлектриков $\text{Ca}_3\text{Co}_{3.85}\text{M}_{0.15}\text{O}_{9+\delta}$ (M – Ti–Zn, Mo, W, Pb, Bi) / А.И. Клындюк, И.В. Мацукевич // Неорган. матер. – 2015. – Т. 51. – № 9. – С. 1025–1031.
- 2 Фазово-неоднородная термоэлектрическая керамика на основе слоистого кобальтита кальция, полученная двухстадийным спеканием / А.И. Клындюк [и др.] // Физика и химия стекла. – 2020. – Т. 46, № 6.– С. 605–614.
- 3 Влияние добавки меди на термоэлектрические свойства слоистого кобальтита кальция, полученного горячим прессованием / А.И. Клындюк [и др.] // Неорган. матер.– 2020.– Т. 56, № 11.– С. 1263–1270.
- 4 Fabrication and thermoelectric properties of $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9/\text{Ag}$ composites / Р.-Н. Xiang [et al.] // J. Alloys and Compd. – 2008.– Vol. 454.– P. 364–369.
- 5 Woermann, E. Phase Equilibria in the system CaO–cobalt oxide in air / E. Woermann, A. Muan // J. Inorg. Nucl. Chem. – 1970. – Vol. 32. – P. 1455–1459.

УДК 621.794.61+621.794.5

М.А. Осипенко, асп.; Д.Е. Потихонин, студ.;
Д.С. Харитонов, канд. хим. наук;
И.И. Курило доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

ИЗУЧЕНИЕ КОРРОЗИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА WE43 В ПРИСУТСТВИИ ПЕРМАНГАНАТА КАЛИЯ

Магний и его сплавы находят широкое применение для использования в качестве конструкционного материала в космической и автомобильной промышленности благодаря их легкому весу, отличной формовости, высоким удельной прочности и обрабатываемости. Однако их годовые потери от коррозии составляют около 30% от объемов производства. Это обуславливает необходимость разработки новых составов экологически безопасных ингибиторов и эффективных способов защиты от коррозии этих сплавов, придания их поверхности новых функциональных свойств.

В настоящее время в промышленности для защиты от коррозии магния и его сплавов широко используют металлические и неметаллические конверсионные покрытия, анодирование и ингибирование.

Цель данной работы – установление влияния концентрации ингибитора на основе перманганата калия на коррозионное поведение сплава магния WE43 в растворах хлорида натрия.

Для изучения защитных свойств использовали метод линейной поляризации в 0.05 М растворе хлорида натрия в отсутствие и при наличии ингибитора. Поляризационные кривые снимались в диапазоне потенциалов от -200 мВ до $+700$ мВ относительно стационарного потенциала.

Как видно из представленных данных, в растворе хлорида натрия в отсутствие ингибитора на границе раздела фаз исследуемый образец /электролит стационарный потенциал составляет -1.40 В. Введение в систему ингибитора приводит к смешению стационарного потенциала в область электроположительных значений.

Из полученных данных видно, что при введении ингибитора в количестве 1 ммоль/дм³ значения плотности тока коррозии возрастает, что обусловлено частичной пассивацией поверхности магния, и, следовательно, изменением истинной поверхности образца. Параллельно с этим протекает процесс восстановления перманганат-ионов при химическом взаимодействии с магниевой подложкой, что ускоряет процесс ее растворения.

В свою очередь, введение в раствор хлорида натрия ингибитора KMnO_4 в количествах 5,0–50,0 ммоль/дм³ приводит к снижению значений плотности тока коррозии. Минимальное значение плотности тока коррозии, а, следовательно, наибольший защитный эффект был достигнут при введении в коррозионную среду 50 ммоль/дм³ ингибитора. Это связано с образованием на поверхности сплава магния сплошной защитной марганецсодержащей пассивной пленки, которая препятствует миграции агрессивных хлорид-ионов к подложке.

Таблица – Данные, полученные из анализа потенциодинамических поляризационных кривых

Концентрация ингибитора, ммоль/дм ³	b_a , В	b_c , В	$E_{корр}$, В	$i_{корр}$, А/см ²	EI , %
0	0,05987	0,078967	–1,4410	7,7020E-6	–
1	0,07561	0,096410	–1,4001	9,0327E-6	–
5	0,03027	0,04128	–1,3105	1,2671E-6	83.54
10	0,02128	0,01965	–1,2514	5,5403E-7	92.80
50	0,00553	0,01243	–1,2317	1,7911E-7	97.67

Для оценки эффективности ингибитора использовали величину защитного эффекта EI , рассчитываемую по уравнению:

$$EI, \% = \frac{i_{корр}^0 - i_{корр}}{i_{корр}^0} \cdot 100,$$

где $i_{корр}^0$, $i_{корр}$ – значения плотности тока коррозии образца в растворе 0.05 NaCl без ингибитора и в его присутствии соответственно.

Расчет защитного эффекта показал, что с увеличением концентрации перманганат-ионов в растворе ингибирующий эффект возрастает и достигает максимального значения 97.67 % при концентрации KMnO_4 в растворе 50 ммоль/дм³.

Таким образом, проведенные исследования показали, что перманганат калия может использоваться в качестве ингибитора процесса коррозии сплава магния WE43 в хлоридсодержащих средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Gusieva, C. H. J. Davies, J. R. Scully, N. Birbilis. Corrosion of magnesium alloys: the role of alloying // International Materials Reviews. – 2015. – Vol. 60. – No. 3. – P. 169–194.
2. G. Ling Song, A. Atrens. Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys // Advanced Engineering Materials. – 1999. – Vol. 1. – No. 1. – P. 11–33.

Н. В. Богомазова, доц., канд. хим. наук;
А.О. Браим, студ.; Т. В. Галковский, асп.;
И. М. Жарский, проф., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК SnS_x , ПОЛУЧЕННЫХ ХИМИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Развитие солнечной энергетики приобретает все большее значение в последние десятилетия. В промышленном производстве солнечных панелей используется высокочистый кремний в различных структурных состояниях. Однако все больший интерес у специалистов по фотовольтаике вызывают тонкопленочные гетеропереходные материалы на основе халькогенидных полупроводников [1].

Объектами исследований в данной работе выступали тонкие пленки сульфидов олова (II). SnS является альтернативным материалом в новом поколении тонкопленочных солнечных ячеек, способным заменить материалы на основе токсичного CdTe , при создании поглощающих слоев гетероструктур КПД которых теоретически может достичь более 25 %.

В рамках данной работы проводилось исследование оптических свойств субмикронных пленок на основе сульфида олова, полученных методом ионного наслаивания или электрохимического осаждения на поверхности планарных подложек ИТО/стекло. В качестве источников металлического и неметаллического компонентов пленок SnS_x использовались соответственно соли SnCl_2 и $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ при их концентрации в растворах наслаивания или электролитах электроосаждения в диапазоне 0,1-0,01 моль/л. Пленки были получены при циклической обработке в растворах катионного и анионного прекурсоров или при импульсной катодной поляризации подложек в комплексном ацетатном электролите. Термическая обработка нанесенных слоев проводилась в воздушной среде при температуре 300°C в течении 30 мин. Состав и толщину пленок идентифицировали по данным EDX-анализа. Спектры оптического пропускания, полученные в диапазоне длин волн 300–1000 нм, обрабатывали в координатах Гауца [2].

Полученные образцы были сгруппированы в зависимости от толщины пленок в 3 серии: Т1 (около 200 нм), Т2 (300-400 нм), Т3 (более 400 нм). По данным полученных спектров оптического поглощения для сульфидных пленок, осажденных на поверхности прозрачных подложек ИТО/стекло, фиксируется высокий коэффициент поглощения более $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ для электроосажденных пленок и пониженный коэффициент поглощения менее $\cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ для химически осажденных пленок. Наличие края собственного поглощения на спектрах и обработка данных в

координатах Тауца (рисунок 1) позволили определить оптическую ширину запрещенной зоны для полупроводников.

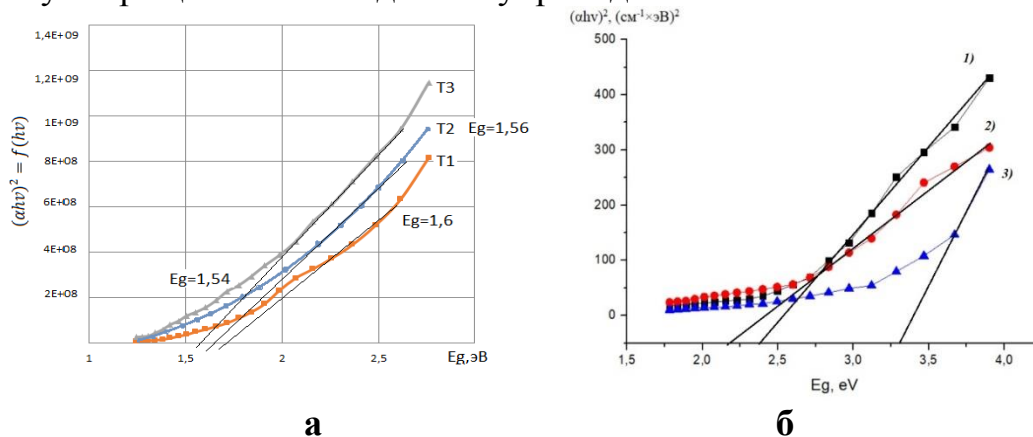


Рисунок 1 – Спектры оптического поглощения пленок SnS_x, полученных при 120 циклах импульсного электроосаждения (а) или при 30 (1), 60 (2) и 90 (3) циклах химического наслаивания (б)

Полученные значения ширины запрещенной зоны для пленок, полученных методом электрохимического осаждения, незначительно отличались для пленок различной толщины и составили величину от 1,54 до 1,6 эВ, что хорошо согласуется с литературными данными для электроосажденных пленок SnS [2]. Для пленок, полученных методом химического наслаивания, оптическая ширина запрещенной зоны была существенно больше и составляла от 2,18 до 3,32 эВ. Такой результат может быть связан с образованием фазы оксосульфида олова, что подтверждается данными энергодисперсионного микроанализа.

Таким образом, в наших исследованиях в качестве предпочтительного метода формирования светопоглощающего слоя моносульфида олова, например для фотовольтаических применений, может быть рекомендован метод электроосаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications / McEvoy A. [et al.]. – Elsevier, 2003. – 585 p.
2. An investigation on SnS layers for solar cell fabrication with CdS, SnS₂ and ZnO window layers prepared by nebulizer spray method / A. M. S. Arulanantham [et al.] // Appl. Phys. A. – 2018. – Vol. 124, № 11. – P. 2418–2425.

Новикова Л.Н. доц., канд. хим. наук;
Ашуйко В.А. доц., канд. хим. наук;
Мартинкевич А.А. доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск);
Урбанович Н.И., доц., канд. техн. наук;
Барановский К.Э. доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА КРАСОК, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ЦИНКОВОЙ ПЫЛИ ОТХОДА ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ

Работа является результатом выполнения темы 4. 1. 26 «Исследование и разработка состава цинксодержащей краски для защитных покрытий напользование отходов горячего цинкования для получения х коррозионностойких красок»

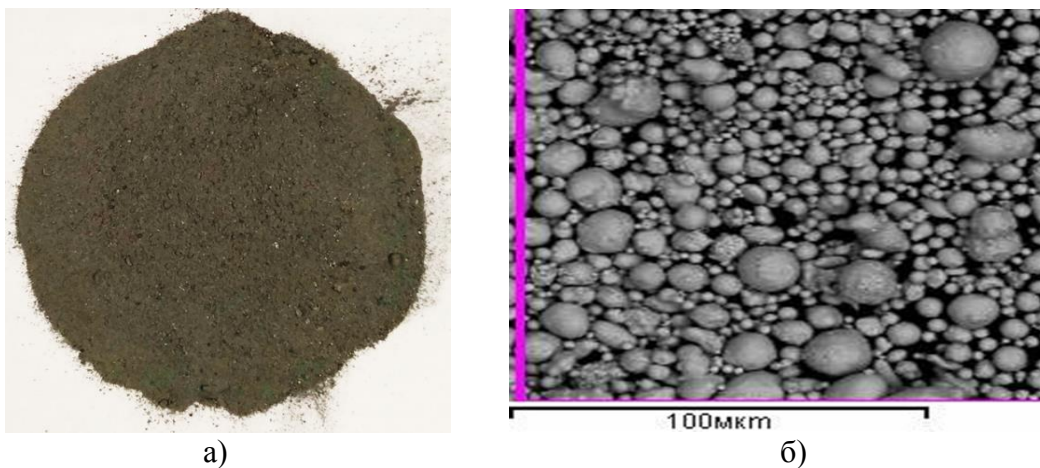
Среди способов защиты металлов от коррозии часто используют нанесение на защищаемую поверхность цинкнаполненных красок. Цинконаполненные краски отличаются высоким содержанием цинка в составе до 96%, чистотой 98–99,99%. Такие антикоррозионные краски могут защищать сталь от коррозии так же надежно, как при «горячем» способе цинкования. Цинкнаполненные покрытия отличаются долговечностью и используются, как правило, для защиты стальных конструкций, сооружений, эксплуатируемых в жестких условиях коррозионного воздействия. Широкому использованию цинкнаполненных лакокрасочных покрытий способствует простая технология окраски, допускающая возможность их нанесения на крупногабаритные конструкции в полевых условиях.

При химическом цинковании некоторые участки сложных стальных деталей остаются без цинкового покрытия. Для достижения требуемого защитного эффекта такие участки деталей удобнее обрабатывать цинксодержащими красками методом гидравлического распыления.

Для проведения испытаний были получены электроды (20x20 мм), которые вырезались из стальной пластины (Ст3) толщиной 1,5 мм, предварительно обработанной пескоструйным аппаратом. Перед нанесением цинкнаполненной краски металлическую поверхность электрода тщательно очищали, обезжиривали, промывали и сушили на воздухе. Далее на стальные электроды (образцы) наносили цинксодержащие краски. Составы цинкнаполненных композиций, которые наносились на образцы для коррозионных испытаний приведены в таблице 1.

Качество покрытия во многом зависит от основного компонента краски – мелкодисперсных частиц цинка. Параметры частиц и количе-

ственное содержание цинка играют основную роль в качестве покрытия [1-3]. Оптимальный размер частиц цинковой пыли, обеспечивающий достижение эффективной электрохимической защиты металла в цинксодержащем покрытии и требуемых технологических свойств, составляет 3–15 мкм. ЛКП должны содержать цинк сферической и пластинчатой формы, благодаря этому в покрытии формируется дополнительная барьерная защита. Общий вид цинковой пыли отход горячего цинкования приведен на рисунок 1. Фракционный состав цинковой пыли представлен на рисунок 2.



а – внешний вид цинковой пыли; б – морфология и размер частиц отхода
Рисунок 1 – Отход горячего цинкования – цинковая пыль

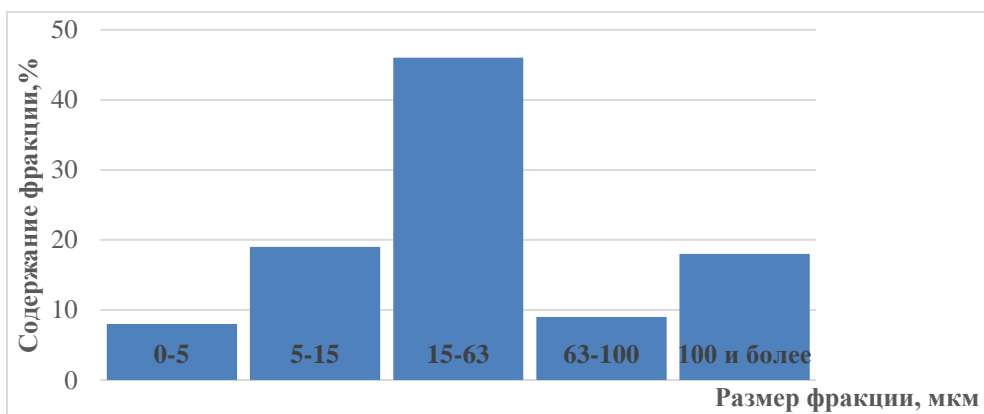


Рисунок 2 – Фракционный состав отхода горячего цинкования – цинковой пыли

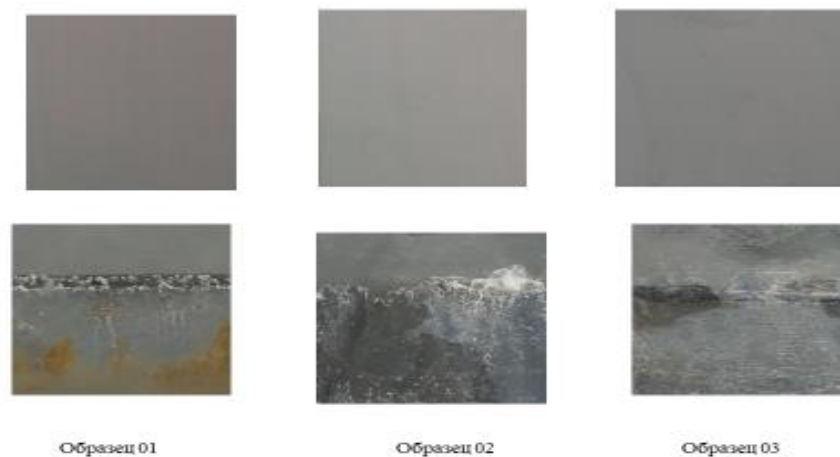
Для приготовления красок могут быть использованы частицы цинковой пыли 0–15 мкм. При использовании в красках более крупных частиц пыли защитные свойства красок ухудшаются.

В таблице 1 приведены составы цинкнаполненных красок и толщина покрытия. Образцы покрытий цинксодержащими красками на основе разных связующих (калиевое жидкое стекло (01), этилсиликат (02), полиакрилат (03)) и цинковой пыли (размер частиц 3 – 15 мкм)

Таблица 1 – Составы цинкнаполненных красок и толщина покрытия

№ композиций (образца)	Пигмент, форма и размер фракции, мкм	Пленкообразователь	Толщина покрытия, мкм
01	Цинковая пыль марки Inst 800, круглая, 3–5,15	Жидкое стекло (концентрированный раствор силиката калия)	120–170
02	Цинковая пыль марки Inst 800, круглая, 3–5,15	Этилсиликатный полимер	120–170
03	Цинковая пыль марки Inst 800, круглая, 3–5,15	Полиакрилат	90–170

Фотографии образцов, подвергнутых коррозионным испытаниям в статических условиях, представлены на рисунке 3. Стальные образцы, покрытые цинксодержащими красками, помещались в емкость, заполненную 3% раствором хлорида натрия, где выдерживались несколько суток. Изменения на поверхности образцов контролировались визуально каждые сутки. После 6 суток образцы были извлечены из раствора, промыты и высушены.



Фотографии образцов до проведения испытаний (верхний ряд). Фотографии образцов после выдержки в 3% растворе раствора 6 суток

Рисунок 3 – Фотографии образцов, подвергнутых коррозионным испытаниям в статических условиях

На фотографии видны продукты коррозии. Наибольшую устойчивость к коррозии показал образец на полиакриловом связующем.

Поэтому для этих образцов проведены электрохимические коррозионные испытания с использованием потенциостата/гальваностата Metrohm Autolab PGSTAT 302N в стандартной трехэлектродной ячейке

с боковым креплением рабочего электрода (изучаемый образец), насыщенным хлоридсеребряным электродом сравнения (нхсэ). и вспомогательным платиновым электродом. Для расчетов использовалось программное обеспечение «IPC2000». Все потенциалы в пересчитаны в шкалу стандартного водородного электрода.

При электрохимических исследованиях снятие катодных и анодных поляризационных кривых на образцах с площадью поверхности 1 см^2 в растворе 3% NaCl. Поляризационные кривые были получены с использованием потенциостата IPC-PRO M, подключенного к персональному компьютеру с программным обеспечением «IPC2000». В трехэлектродной ячейке, изучаемые образцы служили рабочими электродами, вспомогательный электрод – платина, электрод сравнения – насыщенный хлорсеребряный электрод. Перед снятием поляризационных кривых образец выдерживался в растворе ~ 25 мин до установления постоянного значения потенциала. Затем проводилась поляризация образца от стационарного потенциала в катодную область со скоростью 1 мВ/с до потенциала $\sim -1,3 \text{ В}$ (нхсэ). Далее направление развертки изменялось и электрод поляризовался в анодную область. На рисунке 4 приведены катодные и анодные поляризационные кривые нескольких изучаемых образцов.

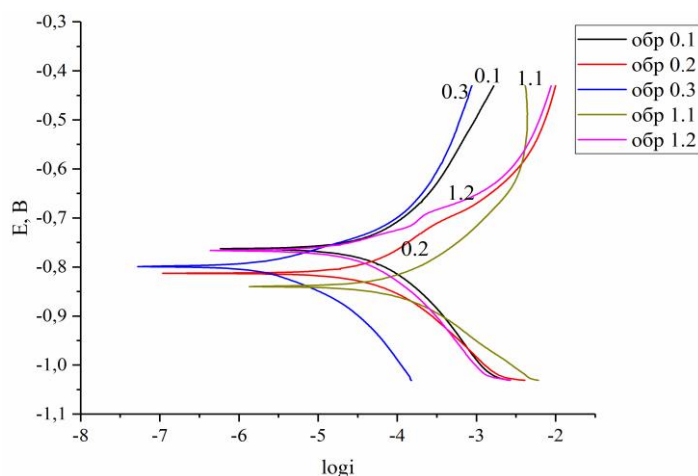


Рисунок 4 – Катодные и анодные поляризационные кривые нескольких образцов

По поляризационным кривым определялись потенциалы и токи коррозии образцов в растворе 3% NaCl. Перед снятием поляризационных кривых образец выдерживался в растворе ~ 25 мин до установления постоянного значения потенциала. Затем проводилась поляризация образца от стационарного потенциала в катодную область со скоростью 1 мВ/с до потенциала $\sim -1,3 \text{ В}$ (нхсэ). Далее направление развертки изменялось и электрод поляризовался в анодную область до достижения анодной плотности тока $\sim 0,1 \text{ мА/см}^2$, после чего направление развертки

потенциала изменялось. Таким образом регистрировалось 2 цикла поляризационных кривых в диапазоне потенциалов от $\sim -1,3$ до $\sim -0,9$ В (нхсэ).

Плотность тока коррозии и потенциал коррозии определяли методом экстраполяции, по пересечению экстраполированных прямолинейных участков тафелевских поляризационных кривых. Средние значения потенциалов и плотности тока коррозии определяли по 2 параллельным опытам.

Ниже в таблице 2 приведены составы образцов новой партии и определенные для них плотности токов коррозии.

Таблица 2– Составы цинксодержащих покрытий и рассчитанные значения плотностей токов коррозии образцов

Номер образца	Состав покрытия	Плотность тока коррозии (i , А/см ²)
1	Zn _{от} (фракц.4-6 мкм, круг.), акрил	1,92E-05
1.1	Zn _{от} (фракц.4-6 мкм, круг.), акрил	1,89E-05
2	Zn _{от} (фракц.0-15 мкм, круг.), акрил	5,24E-06
3	Zn _{от} (фракц.0-15 мкм, круг.), акрил	4,85E-05
4	Zn _{от} (фракц.5-15 мкм, круг.), акрил	4,08E-06
5	Zn _{от} (фракц.0-15 мкм, круг.и 5% чеш.),акрил	4,44E-06
7	Zn _{от} (фракц.0-15 мкм, круг.)и 3% Al.,акрил	1,3236 E-05
8	Zn _{от} (фракц.0–15 мкм, круг.), жидк. ст. (литиевое)	5,5694 E-05
9	Zn _{от} (фракц.0–15 мкм, и 5% чеш), жидк. ст. (литиевое)	1,9058 E-05
10	Zn _{от} (фракц.0–15 мкм) и 3% графита, акрил	3,5060 E-06

Из приведенных данных плотности тока коррозии для образцов № 1–10 видно, что образец № 5 имеет самую малую плотность тока. По этому показателю образцы № 1–6 значительно отличаются от образцов №8–10.

Для образцов рассчитаны величины глубинного показателя коррозии, отражающих скорость их коррозии, которые представлены на рисунке 5. Гистограмма отражает изменения глубинного показателей коррозии образцов видно, что образец №5(·) (Zn_{от}(фракц.0-15+5% чеш. + Акрил), имеет меньшее значение этого показателя.

На основании проведенных определений сделаны выводы:

1. Разработаны составы цинксодержащих красок для защитных покрытий стали на основе цинковой пыли – отхода горячего цинкования. Получены цинксодержащие краски с использованием фракции цинковой пыли (3–15 мкм) и пленкообразователей (жидкое стекло, этилсиликатный и акриловый полимер) и изучены их защитные коррозионные свойства. Определена цинксодержащая краска с лучшими антикоррозионными свойствами.

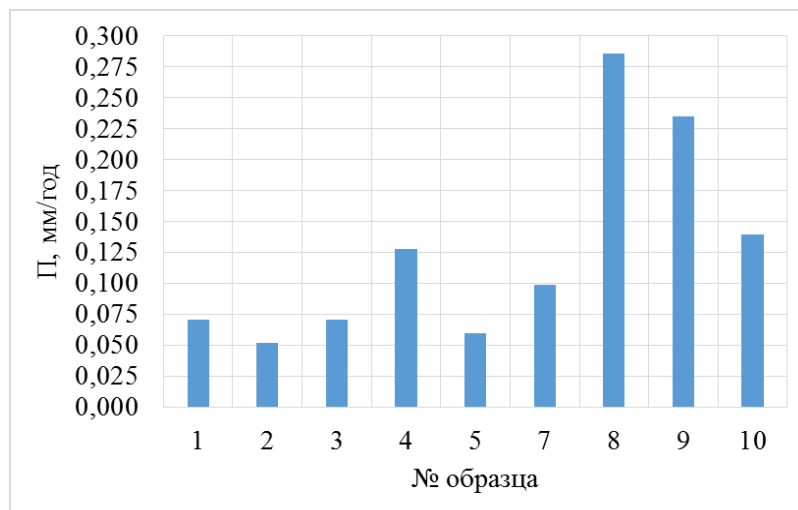


Рисунок 5 – Величины глубинного показателя коррозии образцов

2. Установлена зависимость защитных свойств цинксодержащих покрытий от размера частиц цинковой пыли (отход горячего цинкования) и адгезии краски к поверхности стали. Показано что при превышении размера частиц пыли 15 мкм антикоррозионные свойства покрытий заметно ухудшаются. Изучены антикоррозионные свойства составов цинксодержащих красок на основе акрилового связующего, содержащие разные фракции цинковой пыли (4–6 мкм, 0–15 мкм, 5-15 мкм, Inst 800 3-5,15 мкм) и влияние модифицирующих добавок алюминиевой пудры и графита.

3. Установлен механизм антикоррозионной защиты стали методом электронной импеданс спектроскопии разных цинксодержащих красок. Механизм защиты цинксодержащих покрытий стали на первом этапе связан с проявлением катодной защиты, на втором этапе образование продуктов коррозии цинка приводит к уплотнению покрытия, затягиванию трещин, раковин и появлению дополнительного барьерного эффекта. В случае глубоких повреждений поверхности осуществляется катодная защита стали от коррозии.

4. Электрохимические исследования методом снятия поляризационных катодных и анодных кривых позволили определить токи коррозии и рассчитать весовой и глубинный показатели коррозии в 3% растворе хлорида натрия.

5. Изучены антикоррозионные свойства цинксодержащих красок (отход горячего цинкования фракция 0-15 мкм) на основе эпоксидного и пентафталевого связующего, которые по защитным свойствам превосходят защитные свойства красок на акриловом связующем. Такие составы могут быть рекомендованы производителям грунтовок, красок.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Schaefer, A Miszczyk. Improvement of electrochemical action of zinc-rich paints by addition of nanoparticulate zinc // Corrosion Science. 66 (2013) 380 – 391.
2. G. Bierwagen, L. Hea, D. Tallman, Time-temperature effects in polymer coatings for corrosion protection as analyzed by EIS, Macromolecular Symposia, Special Issue: Quo Vadis – Coatings?, Prog.
3. Цинкнаполненные антикоррозионные грунтовки / А.В. Павлович, В.В. Владенков, В.Н. Изюмский // ЛакоКрасочная промышленность. – 2010. – №3. – С. 38-46.

УДК 666.3:631.811

О. С. Залыгина, доц., канд. техн. наук; Е. С. Латош, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОПА В КАЧЕСТВЕ ВЫГОРАЮЩЕЙ ДОБАВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

Целлюлозно-бумажная отрасль Беларуси ежегодно выпускает около 250 тыс. тонн бумаги и 60 тыс. тонн картона. В качестве исходного сырья используется привозная целлюлоза и макулатура. Производство бумаги относится к водоемким отраслям промышленности, при котором также образуется значительное количество сточных вод. После очистки часть воды возвращается в техпроцесс, часть – сбрасывается на городские очистные сооружения. В процессе очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий образуется скоп, который согласно классификатору отходов, образующихся в Республике Беларусь, относится к отходам 4 класса опасности [1]. Отходы вывозятся в отвалы, где они разлагаются под действием гнилостных бактерий в течение 1-2 лет, что приводит к отчуждению земель и их химико-механическому загрязнению. Поэтому переработка скопа является не только экономической, но и экологической задачей.

В работе исследовался скоп ОАО «Слонимский картонно-бумажный завод «Альбертин», который образуется в результате очистки сточных вод предприятия в количестве около 7 тыс. тонн в год. Состав скопа зависит от сырья, используемого в производстве бумаги и картона – в сточные воды переходит часть коротких волокон исходного сырья, а также компоненты, содержащиеся в бумаге (каолин, мел, тальк, сульфат алюминия и железа, алюминат натрия, карбамид, крахмал, сода, гипохлорит, различные смолы и др.). В сточные воды также попадает смыв печатной краски, содержащей различные органические

и минеральные соединения, в том числе пигменты (соединения цинка, меди, железа, хрома и т.д.) и другие вспомогательные вещества. В скоп будут переходить не растворившиеся в технологической воде компоненты [2].

Скоп имеет серый цвет и запах сырой бумаги. После обезвоживания скоп представляет собой пластины толщиной 5-6 мм и площадью 3-50 см².

В таблице 1 приведены характеристики скопа, полученные при его анализе в лабораторных условиях, а также предоставленные предприятием.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики скопа

Показатель	Лабораторные данные	Данные предприятия
Влажность, %	37	63
Зольность, %	44,06	32
pH водной вытяжки из скопа	8,5	7,8
ХПК в водной вытяжке из скопа, мгО ₂ /л	842,4	460
БПК ₅ в водной вытяжке из скопа, мгО ₂ /л	116	172
Сульфаты в водной вытяжке из скопа, мг/л	33	28

Влажность скопа, определенная в лабораторных условиях, оказалась почти в два раза ниже, чем по данным предприятия, что связано с испарением влаги при хранении скопа. Почти в два раза оказалось выше значение ХПК водной вытяжки, определенное в лабораторных условиях. Остальные показатели различаются незначительно. Также был проведен анализ элементного состава скопа, который представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Элементный состав скопа

Наименование элемента	Содержание элемента, масс. %		
	по литературным данным	по экспериментальным данным	
		в точке 1	в точке 2
C	41,92	40,61	37,03
O	22,63	13,66	14,64
Na	–	0,72	0,75
Mg	0,66	0,69	0,72
Al	6,05	5,78	6,09
Si	6,45	7,65	8,09
K	0,51	0,34	0,36
Ca	21,23	16,99	17,95
Fe	0,46	6,39	6,75
S	–	0,31	0,33
Cl	–	0,28	0,37
Ti	–	0,61	0,65
Cu	–	3,99	4,21
Zn	–	1,97	2,08

Результаты эксперимента показывают, что исследуемый скоп имеет более сложный состав, чем по литературным данным [2]. В небольших количествах присутствуют такие элементы, как Zn, Cu, Ti, что может быть связано с использованием в качестве сырья других марок макулатуры.

Состав скопа свидетельствует о возможности его использования в качестве выгорающей добавки при производстве керамического кирпича. В работе были получены образцы керамического кирпича, содержащие от 5 до 15 масс. % влажного скопа (в пересчете на сухое вещество). Образцы получали методом пластического формования с последующей сушкой и обжигом при 1000 °С.

Было отмечено, что образцы, в которых количество скопа достигало 15 масс. %, отличаются плохими формовочными свойствами и требуют введения большего количества воды. Для полученных образцов были определены такие свойства, как усадка, кажущаяся плотность, водопоглощение и прочность при сжатии (таблица 3).

Таблица 3 – Свойства полученных образцов

Содержание скопа, масс. %	Значение показателя			
	усадка общая, %	кажущаяся плотность, г/см ³	водопоглощение, %	предел прочности при сжатии, МПа
0	12	1,879	13,71	18,1
5	9,8	1,88	15,25	17,1
10	8,0	1,631	18,33	16,4
15	7,3	1,451	21,16	15,8

Было установлено, что с увеличением содержания скопа усадка, кажущаяся плотность и прочность при сжатии уменьшаются, а водопоглощение увеличивается. При этом все полученные образцы соответствуют ГОСТ 530-2007 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия».

Таким образом, осадок сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности (скоп) можно рассматривать как вторичный материальный ресурс и использовать в производстве керамического кирпича, что позволит снизить воздействие целлюлозно-бумажной промышленности на окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1 Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь: утвержден Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды №3-Г от 09.09.2019. – 88 с.

2 Плышевский, С.В. Отходы скопа: состав, свойства и пути утилизации / А.Л. Ковш, Р.Я. Мельникова, А.В. Салита // Экология на предприятии. – № 4. – 2016 г. – С. 35-47.

ПОДБОР ЭФФЕКТИВНЫХ КОАГУЛЯНТОВ И ФЛОКУЛЯНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОАО «КЕРАМИН»

ОАО «Керамин» является крупнейшим в Беларуси предприятием керамической отрасли и производит керамическую плитку различных видов и санитарную керамику.

На всех производствах ОАО «Керамин» действуют современные очистные сооружения сточных вод, модернизация которых была произведена в 2015 г. Эффективность очистки на них позволяет вернуть очищенную воду в технологический процесс.

Исключение составляет завод «Стройфарфор» ОАО «Керамин», где функционируют старые очистные сооружения, которые включают в себя приемную камеру, смеситель, вертикальный отстойник и фильтр-пресс для обезвоживания осадка сточных вод. Сточные воды образуются при мойке оборудования и на линии глазурования санитарной керамики и загрязнены преимущественно взвешенными веществами, концентрация которых составляет более 6000 мг/м³. Основной проблемой при их очистке является загрязнение мелкодисперсными взвешенными веществами, которые представляют собой компоненты глазури.

Для интенсификации очистки в настоящее время используется анионоактивный флокулянт Praestol 2530. Однако, его использование не позволяет достичь необходимой степени очистки, которая не превышает 70%, вследствие чего не представляется возможным возврат очищенной воды в технологический процесс.

В связи с этим целью работы является подбор более эффективных коагулянтов и флокулянтов для очистки сточных вод завода «Стройфарфор» ОАО «Керамин».

Обработка коагулянтами и флокулянтами водных дисперсных систем нашла широкое распространение в практике очистки сточных вод химических, нефтехимических, целлюлозно-бумажных производств, предприятий силикатной промышленности, предприятий по производству синтетических смол и пластмасс, переработке продукции сельского хозяйства и многих других.

Пробное коагулирование осуществляли в цилиндрах объемом 50 мл, с использованием 2%-ных растворов коагулянтов и 0,1%-ных растворов флокулянтов, время отстаивания составляло 30 и 60 мин. Содержание взвешенных веществ оценивали по оптической плотности, также фиксировали высоту слоя осадка.

Как видно из таблицы 1, используемый в настоящее время флокулянт Praestol 2530 не обеспечивает необходимой эффективности очистки, которая составляет всего 67%. Это соответствует концентрации взвешенных веществ в очищаемой воде около 2000 мг/л, что не позволяет вернуть воду в технологический процесс.

Таблица 1 – Результаты пробного коагулирования с использованием флокулянта Praestol 2530

Доза флокулянта, мг на 1 л сточной воды	Высота слоя осадка через 30 минут, см	Эффективность очистки через 30 минут, %	Высота слоя осадка через 60 минут, см	Эффективность очистки через 60 минут, %
0,025	3	54	2,4	54,8
0,05	8,5	45,5	5	65
0,075	9,5	50,9	6	62,5
0,1	11	44,6	7	61,4
0,125	8	64	5	67

Также были исследованы катионоактивные, анионоактивные и неионогенные флокулянты марок Zetag, Magnafloc, MLT и SNF. Исследования показали, что данные флокулянты также не обеспечивают очистку сточных вод завода «Стройфарфор» от мелкодисперсных и коллоидных примесей. Наилучшие результаты были получены при использовании коагулянта сульфата алюминия (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты пробного коагулирования с использованием $Al_2(SO_4)_3$

Доза $Al_2(SO_4)_3$, мг сухого вещества на 1 л сточной воды	Эффективность очистки через 30 минут, %	Эффективность очистки через 60 минут, %
200	5,2	9,5
300	18,9	26,4
400	80,4	85,8
500	89,2	98,5
600	92,5	90,1
700	95,7	97,8

Из таблицы 2 видно, что при времени отстаивания 30 минут достигается эффективность очистки более 95%, а при времени отстаивания 60 минут более 97%. Однако при этом образуется большой слой осадка, который очень медленно уплотняется. Кроме этого, высокая эффективность очистки достигается при довольно большом расходе коагулянта – 700 мг на 1 л сточной воды. Поэтому в дальнейшем исследовались различные комбинации коагулянта сульфата алюминия и флокулянта Praestol 2530 (таблица 3). Использование флокулянта после коагулянта должно обеспечить повышение эффективности очистки сточной воды и уплотнение образующегося осадка.

Таблица 3 – Результаты пробного коагулирования при совместном использовании $Al_2(SO_4)_3$ и Praestol 2530

Доза $Al_2(SO_4)_3$, мг на 1 л сточной воды	Доза Praestol 2530, мг на 1 л сточной воды	Высота слоя осадка через 30 минут, см	Эффективность очистки через 30 минут, %
400	15	9,7	92,4
	30	8,5	98,5
	45	7,7	98,7
	60	10,3	96,9
	75	11,8	95,9
	90	12,5	92,95
500	15	4,0	99,6
	30	4,5	98,3
	45	5,0	95,65
	60	5,2	95,3
	75	6,0	95,35
	90	7,0	95,1
600	15	10,1	98,8
	30	9,8	97,7
	45	7,0	95,4
	60	8,2	95,2
	75	8,3	94,8
	90	8,3	92,2

Как видно из таблицы, использование коагулянта сульфата алюминия и флокулянта Praestol 2530 позволяет добиться высокой эффективности очистки – более 99%. Таким образом была выбрана оптимальная доза коагулянта $Al_2(SO_4)_3$ 500 мг и флокулянта Praestol 2530 15 мг на 1 л сточной воды. В этом случае концентрация взвешенных веществ в очищенной воде составит около 25 мг/л, что позволит вернуть ее в технологический процесс. Это обеспечит снижение водопотребления для производства керамики и снижение экологических платежей за сброс сточных вод.

О. С. Залыгина, доц., канд. техн. наук;
В. И. Чепрасова, мл. науч. сотр.; О. Д. Беляева, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ОТРАБОТАННЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ХРОМИРОВАНИЯ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИГМЕНТОВ

Отработанные электролиты хромирования относятся к жидким отходам гальванического производства.

При грамотной эксплуатации электролит может служить достаточно длительное время. Основной причиной потери его работоспособности является загрязнение вредными примесями (ионами металлов, прежде всего, железа, органическими соединениями, продуктами разложения блескообразователей, смачивателей и др.), которые попадают в ванну вследствие химического взаимодействия электролита с обрабатываемыми изделиями либо в результате поступления их из предшествующих ванн. С целью восстановления работоспособности электролиты подвергаются регенерации. Реализация этого процесса, как правило, осуществляется путем создания непрерывно функционирующего замкнутого контура «технологическая ванна – регенерационная установка» [1]. Количество циклов регенерации велико, однако ограничено вследствие накопления примесей, удаление которых не представляется возможным.

Замена электролитов на различных предприятиях происходит с различной периодичностью – от одного раза в неделю до одного раза в несколько лет. Замену электролитов осуществляют также в случае изменения их состава, например, при смене номенклатуры выпускаемых изделий, при переходе на новые блескообразователи и т. д. Кроме этого, отработанные электролиты образуются при проведении плановых ремонтов оборудования (например, при сливе кубового остатка кассетных фильтров, используемых в системе регенерации электролитов).

В настоящее время на различных предприятиях отработанные электролиты относят либо к сточным водам, либо к жидким отходам. Это связано с тем, что в действующем законодательстве отсутствует четкое разграничение между понятиями «концентрированные сточные воды» и «жидкие отходы». Поэтому на многих предприятиях отработанные электролиты рассматриваются как сточные воды и сбрасываются на очистные сооружения совместно с промывными сточными во-

дами. Это затрудняет работу очистных сооружений вследствие периодического повышения концентрации загрязняющих веществ в сточной воде либо требует значительного количества чистой воды для предварительного разбавления концентрированных отработанных электролитов. Кроме этого, с отработанными электролитами теряются ценные дефицитные металлы, а также увеличивается количество осадка сточных вод, образующегося при химическом (реагентном), электрокоагуляционном и гальванокоагуляционном методах очистки, которые используются на большинстве предприятий.

В соответствии с Классификатором отходов, образующихся в Республике Беларусь, отработанные растворы электролитов являются отходами производства. Проведенный анализ статистической отчетности промышленных предприятий показал, что в Республике Беларусь только 26 предприятий (из более 140) инвентаризируют отработанные электролиты в качестве отходов производства. Класс опасности отработанных электролитов не установлен, что косвенно свидетельствует о том, что данным отходам не уделяется достаточно внимания.

В случае отнесения отработанных электролитов к жидким отходам встает вопрос о правомерности сброса их на очистные сооружения и далее в канализационные сети. На предприятиях сброс отработанных электролитов на очистные сооружения рассматривают как обезвреживание отходов. Однако, согласно закону Республики Беларусь «Об обращении с отходами» обезвреживание отходов должно осуществляться исключительно на объектах обезвреживания отходов, которые подлежат обязательной государственной регистрации. В настоящее время в государственном Реестре объекты обезвреживания отработанных электролитов отсутствуют.

Ранее нами была исследована возможность использования электролитов цинкования, никелирования и меднения для получения пигментов [2, 3]. Высокая концентрация ионов хрома в отработанных электролитах хромирования (100-250 г/л), а также хромофорные свойства соединений хрома позволяют предположить, что на их основе также могут быть получены пигменты различной цветовой гаммы.

Пигменты – это высокодисперсные порошкообразные красящие вещества, практически нерастворимые в воде, органических растворителях и других окрашиваемых средах. Все пигменты делятся на две основные группы: ахроматические и хроматические. Хромовые пигменты относятся к хроматическим. Многие из соединений трехвалентного хрома окрашены либо в фиолетовый, либо в зеленый цвет. Пигментами хрома зеленого цвета являются:

- изумрудная зелень (гидрат окиси хрома) – $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$;
- соединения типа шпинелей;

- оксид хрома – Cr_2O_3 ;
- силикаты или фосфаты хрома.

Наиболее распространенными хромовыми пигментами являются изумрудная зелень и оксид хрома. Хромовые шпинели и силикаты применяются в керамической промышленности, фосфаты хрома в настоящее время используются редко. В широких пределах для соединений хрома характерно изменение окраски при постоянном химическом составе. Окраска хромовых соединений зависит от температуры раствора, наличия избытка кислоты и т.д.

В настоящее время в Беларуси отсутствует сырье для производства пигментов, в том числе хромовых. Поэтому весьма актуальным является их производство из отходов, каковыми являются отработанные электролиты хромирования.

Одной из проблем при использовании отработанных электролитов хромирования для получения пигментов является необходимость восстановления ионов хрома (VI) до ионов хрома (III) для его последующего осаждения.

На основе анализа литературы в качестве восстановителя был выбран сульфит натрия Na_2SO_3 . Восстановление осуществлялось 10%-ным раствором Na_2SO_3 с 10%-ным избытком по сравнению со стехиометрическим. При этом было установлено снижение концентрации ионов хрома (VI) со 100-250 г/л до 10-15 г/л. Далее при осаждении хрома (III) различными осадителями были получены материалы зеленого цвета, что свидетельствует о возможности использования отработанных электролитов хромирования в качестве сырья для производства пигментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий / Е. А. Урецкий. – Брест. – 2007. – 407 с.
2. Чепрасова, В. И. Отработанные электролиты цинкования как вторичное сырье для получения пигментов / В. И. Чепрасова, О. С. Залыгина // Журнал прикладной химии. – 2017. – Т. 90. – № 3. – С. 318–326.
3. Чепрасова, В. И. Исследование возможности получения пигментов из отработанных электролитов меднения и никелирования / В. И. Чепрасова, О. С. Залыгина // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (98). – С. 83–87.

ФИТОТОКСИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНОЙ ВЫТЯЖКИ ДРЕВЕСНОЙ ЗОЛЫ

Древесные отходы, образующиеся в процессе заготовки древесины, ее обработки и переработки в продукцию, зачастую используются в качестве топлива на энергетических объектах. Это позволяет частично уменьшить количество древесных отходов, подлежащих захоронению, и снизить затраты на покупку дорогостоящих классических видов топлива. Однако в процессе сжигания древесной массы образуется отход – древесная зола. Согласно классификатору отходов [1] зола и пыль топочных установок имеют третий класс опасности. Данные отходы обычно не используются и подлежат хранению или захоронению.

Одним из направлений использования древесной золы является ее применение в качестве удобрения, поскольку в ее составе присутствуют питательные элементы (калий, фосфор, микроэлементы). Вместе с тем, известно, что в составе древесной золы могут присутствовать ионы тяжелых металлов, в количествах вызывающих угнетение всхожести семян и развития растений.

Цель работы – определение фитотоксических свойств водной вытяжки зольного остатка, полученного при сжигании древесных материалов.

В работе исследована общая токсичность водной вытяжки древесной золы методом фитотестирования с использованием семян ржи посевной (*Secale cereale* L.).

В исследованиях использовали неповрежденные семена ржи со всхожестью не менее 95%. Для получения водного экстракта зольного остатка (отхода, образующегося в процессе сжигания древесной массы, на одном из деревообрабатывающих предприятий Республики Беларусь), использовали дистиллированную воду при массовом соотношении отход:экстрагент, как 1 : 10 [2]. Взаимодействие жидкости и отхода осуществлялось в течение одних суток при периодическом перемешивании пробы. После разделения фаз фильтрат разбавляли дистиллированной водой в объемных соотношениях фильтрат:дистиллированная вода = 1:1, 1:3, 1:5, 1:8 и 1:10. Полученные растворы помещали в чашки Петри, где находились 25 семян ржи. Пробы термостатировали при температуре 23 °С в течении 7 суток. В последующем производили из-

мерение длины проростков и корней семян ржи. В качестве контрольной выступала проба, полученная в идентичных условиях на основе дистиллированной воды.

Результаты исследований фитотоксического эффекта водной вытяжки древесной золы в отношении корней семян ржи свидетельствуют о том, что среднее значение длины корней образцов семян, помещенных в раствор при минимальном разбавлении водной вытяжки из отхода (проба, полученная при соотношении фильтрат : дистиллированная вода, равная 1 : 1) максимально и составляет 116 мм, что на 20 мм больше, чем для семян, помещенных в дистиллированную воду. Полученные результаты, вероятно, обусловлены присутствием в составе исследуемых растворов питательных элементов, выделенных из образца древесной золы. При последующем разбавлении водной вытяжки дистиллированной водой средняя длина корней семян ржи уменьшается, достигая величины 95 мм при соотношении фильтрат:дистиллированная вода = 1 : 5, и при дальнейшем разбавлении вытяжки не изменяется. Это обусловлено снижением питательных веществ в растворе.

Установлено, что средние значения длины проростков семян ржи, полученные в опытных образцах, при разбавлении фильтрата водой при соотношениях 1 : 3, 1 : 5 и 1 : 8, меньше длины проростков контрольной пробы на 7 мм, 7 мм и 4 мм соответственно. Наблюдаемые явления, вероятно, обусловлены присутствием в составе вытяжки из отхода высокотоксичных соединений. Длина проростков семян, помещенных в раствор при минимальном разбавлении вытяжки водой, составляет 84 мм, что на 12 мм больше аналогичного показателя семян из контрольной пробы. Это, возможно, объясняется высоким содержанием питательных элементов, что компенсирует действие высокотоксичных соединений, присутствующих в растворе. При максимальном разбавлении вытяжки водой длина проростков семян ржи в опытном и контрольном образце равны 72 мм.

Полученные результаты свидетельствуют о незначительном фитотоксическом эффекте древесной золы на семена ржи.

ЛИТЕРАТУРА

1. ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» // Утв. постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 9 декабря 2019 г. № 3-Т.
2. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности: Методические рекомендации. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. – 15 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Лесные ресурсы являются национальным богатством Республики Беларусь. Согласно данным статистической отчетности [1] по состоянию на начало 2020 года доля лесных земель составляла 42,5% от всей площади земельных угодий страны. Общий запас лесных насаждений равен 1831,8 млн. м³, при этом в 2019 году заготовлено 27,0 млн. м³ ликвидной древесины. В процессе заготовки, обработки и переработки древесины образуются древесные отходы. Количество древесных отходов, образовавшихся в Республике Беларусь в 2019 году, составило 2426,52 тыс. т. Несмотря на значительный объем использования рассматриваемых отходов в различных областях народного хозяйства, проблема переработки древесных отходов является актуальной.

Проблема использования древесных отходов обусловлена несколькими аспектами:

- 1) большим разнообразием древесных отходов;
- 2) рассредоточением мест образования отходов: при заготовке, обработке и переработке древесины, в процессе использования продукции из древесных материалов;
- 3) разнообразным дисперсным и химическим составом отходов (некоторые виды древесных материалов в процессе производства продукции подвергаются пропитке растворами химических соединений, смешивают со связующими веществами и др.);
- 4) отсутствием налаженной системы сбора древесных отходов, образующихся в процессе использования продукции из древесных материалов.

Все вышеуказанное усложняет процесс вовлечения древесных отходов в хозяйственный оборот.

Одним из перспективных направлений применения древесных отходов является их использование в качестве сорбционных материалов при очистке сточных вод и газовоздушных выбросов от высокотоксичных веществ. Применение целлюлозосодержащих материалов в природоохранной деятельности и, в частности, в практике очистки загрязненных газовоздушных потоков и сточных вод, известно давно. В настоящее время идет поиск способов модификации древесных отходов для увеличения их сорбционной емкости за счет химических и (или) физических воздействий.

Цель работы – определение сорбционных свойств древесных отходов, обработанных раствором карбамида, в отношении ионов меди и никеля.

В исследованиях использовали модельные сточные воды –аналог промывных стоков, образующихся в гальваническом производстве и содержащих ионы тяжелых металлов. Определение концентраций ионов меди и никеля проводили титриметрическим методом [2] в растворе после взаимодействия металлов с модифицированными древесными опилками в течение 2 часов. В качестве сорбента применяли древесные опилки, обработанные раствором карбамида, отмытые от пропиточного раствора дистиллированной водой и высушенные при 105 °С. Начальные концентрации ионов тяжелых металлов в растворе изменялись в диапазоне 0,1-2,0 г/дм³.

Установлено, обработка древесных опилок раствором карбамида способствует активации поверхности сорбента и увеличивает его сорбционную емкость в отношении ионов меди на 16% по сравнению с исходными образцами древесных отходов. Применение модифицированных древесных отходов в качестве сорбента ионов никеля, содержащихся в воде, не столь эффективно. В данном случае, величины сорбционной емкости для исходных и модифицированных древесных отходов практически равны.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования древесных отходов в процессах очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Для извлечения ионов меди из гальванических стоков целесообразным является применение модифицированных древесных отходов, полученных путем химической активации поверхности сорбента за счет обработки последнего раствором карбамида. Реализация такого процесса очистки является экономически целесообразной при наличии в непосредственной близости от промышленного объекта с гальваническими цехами деревообрабатывающего производства, поскольку это минимизирует затраты на транспортировку отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Статистический сборник. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2020. – 203 с.

2. Лихачева, А.В. Химия окружающей среды. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие для студ. / А.В. Лихачева, Л.А. Шибека. – Минск: БГТУ, 2011. – 204 с.

ПРОБЛЕМЫ БИОПОВРЕЖДЕНИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ

В XX века внимание многих ученых привлекают биодеструкция (биоповреждения), на которую внимание имеют микроскопические грибы, которые известны как продуценты биологически активных и практически важных веществ, в частности: ферментов, антибиотиков, токсинов, факторов роста растений, органических кислот и прочее, но несмотря на большой объем исследований и значительный практический потенциал, остается вне поля зрения ученых. С учетом потребностей интенсификации промышленного и сельскохозяйственного производства и все более широкого применения химических средств существенно возрастает антропогенная нагрузка на окружающую среду. Также, имеет бесспорно важное значение, показатель грибостойкости для многих материалов бетона, дерева, резины и другие являющихся основной и составляющей многих изделий, которые широко применяются в строительстве и различных отраслях хозяйства. Поэтому, особенно важным является исследование данных материалов и изделий на грибостойкость, в случае введения новых компонентов в их состав, поскольку микроскопические грибы способны интенсивно расти и развиваться на таких субстратах в условиях повышенной температуры и влажности и, как следствие, менять физико-химические и механические свойства и способствовать их деструкции [1, 2]. Кроме этого, поврежденные материалы и изделия становятся источником инфицирования окружающей среды спорами микроскопических грибов.

Древесина – сравнительно твердый и прочный волокнистый материал, используется в качестве строительного материала и топлива, в размельченном и химически обработанном виде - как сырье для древесноволокнистых плит – главный фактор развития цивилизации, один из важнейших для человека видов сырья, без которого не могли бы обойтись многие отрасли промышленности. По объему использования и разнообразию применения в народном хозяйстве с древесиной не может сравниться ни один другой материал, обрабатывается, с малой теплопроводностью, высокой прочностью, при небольшой массе хорошая сопротивляемость ударных и вибрационных нагрузок, в сухой среде долговечна; недостатки: подвержена горению, загниванию, разрушения от воздействия насекомых и грибов, гигроскопична, разбухает и подвергается усушке, короблению, растрескиванию, имеет

недостатки биологического происхождения, которые снижают ее качество.

Древесина подвергается воздействию микродеструкций и энтомологических повреждений. Биодеструкция (биоповреждения) – особый вид коррозионно-агрессивного воздействия окружающей среды, основа – влияние живых организмов, продуктов их жизнедеятельности на материал. Распространенными биологическими деструкторами есть грибы, бактерии, насекомые, водоросли, мхи, лишайники и иногда высшие растения [2]. В большинстве случаев появление и развитие грибов деструкторов на любых конструктивных элементах – результат повышенной влажности вследствие поврежденного состояния крыш, водопроводных, канализационных труб, неправильного режима эксплуатации зданий или сооружений. В новых домах проблемы биоповреждения связывают с использованием недостаточно просушенных или пропитанных антисептиком лесоматериалов. При развитии биоповреждения и его влияние на здание, грибы, которые попали на поверхность конструкции, образуют в процессе жизнедеятельности ферменты, при взаимодействии со строительными целлюлозно-содержащими материалами превращают их составляющие в доступные органические соединения (вода и диоксид углерода). Конечный результат процесса микодеструкции – разрушение органической массы, изменение анатомического строения материала, потеря физико-механических свойств. Повреждения материала микроорганизмами – сложный процесс [1]. Нужно учитывать синергизм биоповреждения – между существующими на поверхности материала микроорганизмами возникают функциональные взаимосвязи, которые существенно влияют на процесс повреждения материала. Объясняется тем, что контаминация может происходить со значительной разницей во времени попадания на поверхность спор различных видов, с различными физиолого-биологическими свойствами. Взаимодействие таких организмов происходит не сразу, а постепенно: развивается более конкурентоспособный вид, что в процессе жизнедеятельности трансформирует определенные структуры материала и создает условия для развития других видов [2], важнейший, отвечающий за дальнейший ход процесса биодеструкции, который не всегда учитывается при исследованиях.

Результатом поражения конструкций дома – разрушения и возникновение опасной ситуации для здоровья и жизни человека. Для характеристики качества внутренне воздушного пространства домов введен термин "синдром больного здания" ("sick" «buildingsyndrome»), симптомами являются возникновение у людей

раздражение глаз, дыхательных путей и кожи, появление головной боли и усталости, а также специфического запаха и вкусовых ощущений, связывают с нахождением в среде микромицетов, их активной жизнедеятельности, когда они выделяют метаболиты, летучие органические соединения, вызывающие неприятный запах, опасные в больших дозах, и микотоксины, вторичные метаболиты плесневых грибов, способные инициировать аллергическую или токсическую реакцию при малых концентрациях. В организм человека попадают тремя способами: оральным (с инфицированной пищей), ингаляционным (вдыхая споры токсикогенных грибов), при прямом контакте через кожу [2]. Степень токсичности и свойства зависят от химической структуры и концентрации, а уровень выработки - от влажности субстрата и тепловых условий. С грибов паразитов наиболее серьезным является домовая, или плачет, гриб. Условиями его роста - наличие сырости, отсутствие света и проветривания, отщеп, скол, вырывание и прочее, нарушаются составляющие древесины, снижаются ее прочность, прочности на растяжение [3]. Опасность для окружающей среды и здоровья человека при микологическом повреждении деревянных конструктивных элементов зданий и сооружений – разрушение частичное или полное конструктивных элементов здания, следствие – экономические, социальные и экологические убытки; аллергические и болезненные реакции человека благодаря воздействию на организм метаболитов – микодеструкторы. Распространённый способ защиты древесины от биологического разрушения – биоциды, активное вещество, негативно влияет на здоровье человека, окружающую среду; нами предложено, исследовано специальное разработанное покрытие, без негативного влияния на окружающую среду, в дальнейшем нами запланированы серии экспериментов [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайловський, Д. В. Древина – сучасний будівельний матеріал / Д. В. Михайловський, Р. В. Заєць, А. Г. Чубарев // Містобудування та територіальне планування: НТЗ. – К.: КНУБА, 2014. – 250 с.
2. Власов, Д. Ю. Биодеструкция строительных материалов и пути защиты от биокоррозии // Alitinform, 2009. – 67 с.
3. Журавська, Н. Є. Енергоресурсоекологізберігаючі технології для підвищення захисту від біопшкодження будівельних конструкцій та матеріалів. Містобудування та територіальне планування: НТЗ. Від. ред. М. М. Осетрін. – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 61 (спец.) – С. 170–173.

ПРОБЛЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОСАДКАМИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ КАНАЛИЗАЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

В настоящее время в Республике Беларусь эксплуатируется 1300 очистных сооружений канализации (ОСК), из них около 600 – специализированные сооружения, включающие отстаивание, биологическую очистку в биореакторах, отделение активного ила от очищенной воды. В процессе очистки сточных вод на ОСК образуется ряд отходов: песок, улавливаемый в песколовках; отходы, задерживаемые на решетках (отбросы); сырой осадок, отделяемый в первичных отстойниках; избыточный активный ил. В наибольшем количестве образуются осадок сооружений биологической очистки хозяйственно-фекальных сточных вод (сырой осадок) и избыточный активный ил. Осадки сточных вод (ОСВ), близкие по составу осадкам ОСК, образуются в процессах очистки производственных сточных вод. В основном это избыточный активный ил. За 2019 год в Республике Беларусь на очистных сооружениях образовалось более 2,15 млн. тонн влажных осадков.

В отличие от других отходов производства и потребления, образования осадков избежать не удастся и в ближайшие годы их количество, по мере повышения эффективности работы действующих очистных сооружений и строительства новых, будет возрастать.

В настоящее время в Беларуси в области обращения с ОСВ преобладает размещение на иловых площадках и других объектах хранения. Для хранения в основном размещаются нестабилизированные или частично стабилизированные осадки. ОСВ после механического обезвоживания при отсутствии приемлемых вариантов использования также размещаются на объектах хранения.

В Реестре объектов хранения и захоронения отходов в качестве объектов хранения представлены: иловые площадки, иловые и песковые площадки, иловые пруды, илонакопители, отстойники осадка биологических прудов, площадки для хранения осадка и очистные сооружения, на территории которых хранятся осадки. Основная масса образовавшихся осадков хранится на объектах хранения площадью свыше 10 га. В настоящее время возможности размещения осадков на объектах хранения в Республике Беларусь практически исчерпаны. Существующая нормативная правовая база и сложившаяся практика обращения с осадками, как с одним из видов отходов, не позволяет в полной мере использовать их потенциал как ценного возобновляемого вторичного сырья.

Учитывая то, что основная масса осадков образуется на ОСК, важнейшее значение приобретает переход на новые подходы к их реконструкции, базирующиеся на подходах, характерных для циркуляционной экономики. Ключевую роль в переходе ОСК на принципы циркуляционной экономики играют используемые варианты обращения с осадками очистных сооружений. Выбор вариантов зависит от многих факторов, в числе которых уровень научных и технических достижений, принятая политика и стратегия в области водоотведения и использования осадков, требования законодательства, доступность финансовых средств.

Для обработки и использования ОСВ разработано и апробировано множество технологий и специального оборудования. Разнообразие технологических решений, которые нашли применение на практике, обусловлено сложным многокомпонентным составом и уникальным набором свойств, характерных для осадков. Выбор направлений использования и технологий обработки ОСВ для конкретного объекта представляет собой достаточно сложную задачу.

Среди известных направлений использования ОСВ можно выделить три основные:

- использование на земле (рекультивация нарушенных земель, внесение в качестве органоминерального удобрения и почвоулучшающей добавки под сельскохозяйственные культуры, лесное хозяйство и т.п.);
- использование в производственных процессах (в качестве выгорающей добавки в производстве строительной керамики, в составе материалов при производстве дорожно-строительных работ и др.);
- энергетическое использование (биогазовые технологии, монсжигание и сжигание в смеси с другими отходами).

Направление использования и технология обработки выбираются с учетом состава и свойств осадков, особенностей конкретного объекта и целого комплекса условий, ограничений и требований. Важно, чтобы ОСК, кроме традиционной роли, заключающейся в обеспечении соблюдения норм, установленных для очищенных сточных вод, в контексте экономики замкнутого цикла могут рассматриваться в качестве объектов, производящих ресурсы и энергию.

В области производства ресурсов ОСК могут обеспечивать производство углеводородного сырья, углерода, производство минеральных (например, струвита) и органоминеральных удобрений. За счет использования энергетического потенциала неочищенных, очищенных сточных вод и осадков могут обеспечить производство электрической и тепловой энергии; производство твердого топлива, биометана и др.

Выбор технологии подготовки ОСВ должен производиться путем сравнения альтернативных вариантов технологических решений и оборудования для условий конкретной ОСК. При проведении анализа возможных вариантов проектных решений по подготовке и использованию ОСВ в обязательном порядке составлять материальный и энергетический балансы, проводить анализ жизненного цикла по эколого-экономическим показателям как всего комплекса по использованию осадков, так и основного технологического оборудования.

Анализ существующей практики обращения с осадками в Беларуси и потребностей в продукции и материалах, которые могут быть получены из ОСВ, на период становления системы обращения с осадками следующие направления использования: для рекультивации мини-полигонов и выработанных карьеров; в качестве изолирующего слоя на полигонах ТКО; для рекультивации нарушенных земель; в качестве почво-грунтов при создании энергетических плантаций короткого цикла ротации; городском хозяйстве (планировка территории, цветоводство, питомники и т. п.).

УДК 628.381.1

В. Н. Марцуль, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

АНАЛИЗ НОРМАТИВНОГО ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОСАДКАМИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ КАНАЛИЗАЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Осадки сточных вод, как отдельный объект нормативного правового регулирования в области обращения с отходами в Республике Беларусь не выделяются. Поэтому деятельность по обращению с этими отходами, вне зависимости от источников образования, регламентируется нормативными правовыми актами и техническими нормативными правовыми актами, устанавливающими требования и порядок обращения с отходами. Правовые основы обращения с отходами определяет Закон Республики Беларусь от 20 июля 2007 г. № 271-З «Об обращении с отходами». С момента принятия в него неоднократно вносились изменения и дополнения. Последние изменения вступили в силу 9 декабря 2019 года [1]. Закон обязывает юридических и физических лиц, в том числе индивидуальных предпринимателей, осуществляющих обращение с отходами (Статья 17 указанного Закона), выполнять ряд требований и осуществлять деятельность, направленную на уменьшение объемов образования отходов и предотвращение их вредного воздействия на окружающую среду, на максимальное вовлечение их в гражданский оборот. Порядок осуществления этой деятельности конкретизирован в документах [2, 3].

При учете образования осадков, согласно действующему положению, данные о количестве осадков сооружений биологической очистки хозяйственно-фекальных сточных вод, ила активного очистных сооружений отражаются в тоннах влажного осадка, без указания его влажности. Влажность осадков, перекачиваемых на иловые площадки, постоянно не контролируется. В связи с этим данные по количеству образующихся осадков, представляемые различными очистными сооружениями канализации (ОСК), трудно сопоставимы.

Для организации учета отходов используется Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь (ОКО РБ) [4]. В ОКО РБ осадки не дифференцируются в зависимости от того, какой обработке они подвергаются. В частности, никак не учитывается прошли ли они стабилизацию.

Осадки ОСК в Беларуси не являются объектами аналитического контроля, т.е. на очистных сооружениях контроль их состава по установленному перечню показателей не производится. Это не позволяет обоснованно подходить к выбору способов их обработки и направлений использования, выявлять тенденции изменения их состава, оценивать эффективность мероприятий по ограничению сбросов загрязняющих веществ абонентами сетей канализации, особенно в части содержания тяжелых металлов.

В Республике Беларусь не приняты государственные стандарты, устанавливающие требования к осадкам ОСК, используемым по различным направлениям (в качестве удобрений, при рекультивации нарушенных земель и др.). В настоящее время прошли государственную регистрацию технические условия (ТУ), устанавливающие требования к продукции из осадков сточных вод: ТУ ВУ 790282162.009-2015 Составы для рекультивации нарушенных земель (РУП «Завод газетной бумаги»); ТУ ВУ 300003249.001-2009 «Удобрение и почвоулучшающая добавка из осадков сточных вод» (УП «Витебскводоканал»); ТУ ВУ 291000450.001-2015 Удобрение органическое на основе обезвоженного сброженного осадка сточных вод (КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод»).

В соответствии с действующей в Беларуси процедурой, для того, чтобы организовать использование осадков ОСК, собственнику этих отходов необходимо разработать проект ТНПА (чаще всего ТУ) на продукцию из осадков, организовать прохождение государственной экологической экспертизы и государственную регистрацию этого ТНПА, разработать технологический регламент подготовки к использованию и использования осадков ОСК, провести регистрацию объекта по использованию отходов.

В случае использования осадков в качестве удобрений, непонятно, какой объект по использованию отходов нужно регистрировать? Земельный участок? Если из осадков производится материал для рекультивации, или удобрение, которые поставляются на продажу, то при его использовании отсутствует механизм контроля за соблюдением требований охраны окружающей среды потребителем.

Анализ нормативного правового регулирования обращения с осадками ОСК в Республике Беларусь свидетельствует о том, что в настоящее время не в полной мере созданы условия для вовлечения их в хозяйственный оборот при соблюдении требований охраны окружающей среды. В связи с этим давно назрела необходимость изменения подходов к нормативному правовому регулированию обращения с осадками ОСК, особенно в части установления норм и требований, которые позволяли бы обоснованно подходить к выбору способов их обработки и направлений использования. Необходимо разработать и ввести в действие обязательный для исполнения технический нормативный правовой акт, устанавливающий единые требования к составу и свойствам осадков, порядку их применения для различных направлений использования (допустимое содержание тяжелых металлов и других опасных компонентов в осадках в зависимости от направления использования; требования по санитарно-бактериологическим показателям; допустимое количество осадков для использования на земле в зависимости от периодичности их внесения под сельскохозяйственные культуры, для рекультивации и др.), периодичности аналитического контроля осадков и почвы по установленному перечню показателей и методикам выполнения измерения .

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Беларусь от 10 мая 2019 г. № 186-З Об изменении Закона Республики Беларусь «Об обращении с отходами»)
2. Постановление Совета Министров «О порядке обращения с отходами» от 28.11.2019 г. № 818.
3. Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 20 ноября 2019 г. № 39 «Об обращении с отходами».
4. ОКРБ 021-2019 Общегосударственный классификатор Республики Беларусь. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь. Минприроды, Минск.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ ФОРМАЛЬДЕГИДА

Производство композиционных материалов из древесины (ДСП, фанера, МДФ) становится одной из самых динамично развивающейся подотраслей деревообрабатывающей промышленности России, где прогнозируется увеличение объемов потребления ДСП и МДФ за счет роста мебельного рынка.

Между тем, как технологии 60–70 гг. прошлого века, так и современные линии непрерывного прессования являются основными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух деревообрабатывающими производствами.

Так для изготовления древесностружечных плит применяются карбамидоформальдегидные связующие, содержание которых в плите при горячем прессовании составляет 8–12 %. В настоящее время используются смолы КФ-МТ-15(Е1).

Объемы удаляемого вентиляционного воздуха, в силу специфики производства, значительны и достигают 160 тыс. м³/час. Объем отходящих газов от трех линий по производству МДФ составляет 480 тыс. м³/час.

Задача по очистки вентиляционных выбросов может решаться следующими способами: термическое обезвреживание (дожигание); каталитическое окисление; адсорбционная очистка (активированный уголь); химическая абсорбция.

Реализации этих способов требует решения ряда проблем. Обобщая способы очистки можно выделить следующие: значительные энергозатраты на нагрев вентиляционного воздуха до температуры его термического или каталитического окисления; образование новых загрязняющих веществ - продуктов сгорания топлива; предварительная тонкая очистка вентиляционного воздуха от взвешенных частиц; необходимость периодической или поточной замены сорбента; постоянная подпитка веществами-реагентами.

Применительно к условиям производства композиционных материалов на основе древесины решение данных проблем требует значительных капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Альтернативой приведенным способам очистки является абсорбционно-биохимическая технология очистки вентиляционного воздуха. Технологическая схема обезвреживания загрязняющих веществ в абсорбционно-биохимической установке (АБХУ) состоит из

двух процессов: абсорбция формальдегида и фенола водой и биохимической регенерации загрязненного раствора для повторного использования в АБХУ. Данная система очистки используется на большинстве предприятий Республики Беларусь и так же имеет ряд недостатков:

- гибель микроорганизмов при превышении концентрации формальдегида в растворе;
- очистка выбросов в диапазоне концентраций формальдегида 1–100 мг/м³;
- необходимость поддержания жизнедеятельности микроорганизмов при остановке производства;
- поддержка оптимальных условий среды;
- адаптации микроорганизмов.

В данной работе было предложено два направления модернизации данного метода очистки:

- 1) совершенствование процесса абсорбции с использованием хемосорбентов;
- 2) замена биологической части системы на химическое окисление.

Для выполнения задач было изучены:

- процессы хемосорбции с растворами карбамида и аммиака и влияние рН на данный процесс;
- процессы химического окисления озоном уловленного абсорбентом формальдегида, с различной его концентрацией в абсорбенте.

В результате проведенных исследований было установлено, что:

- использование в качестве хемосорбента раствора карбамида концентрацией 20% при рН = 10 повышает поглощение формальдегида из выбросов на 17% при концентрации 320 мг/м³ и на 14% при концентрации 130 мг/м³.
- при использовании 1% раствора аммиака эффективность поглощения формальдегида при концентрации в выбросах 320 мг/м³ увеличилось на 15%, а при концентрации 130 мг/м³ – на 25%.

Альтернативным вариантом усовершенствования технологии очистки выбросов является заменой биологической части АБХУ на химическое окисление.

Так как в процессе работы абсорбера концентрация формальдегида в абсорбенте может изменяться в широких пределах, в исследовании использовали растворы с различной концентрацией формальдегида.

По результатам проведенных опытов можно сделать вывод, что окисление озоном наиболее эффективно происходило при концентрации формальдегида 300 мг/л, времени озонирования 120 минут, и при постоянном рН равным 10. При этом степень очистки достигала 95–98% по формальдегиду.

По итогу проделанной экспериментальной работы, можно сделать вывод что окисление озоном является наиболее эффективным способом для модернизации абсорбционного способа очистки выбросов от формальдегида.

На основании полученных данных предложена модернизированная схема очистки выбросов от формальдегида.

УДК 628.5:621.311.22

А. В. Дубина, ассист; М. А. Комаров, асп.;
Т. И. Деткова, студ. (БГТУ, г. Минск);
В. И. Романовский, ст. науч. сотр., канд. техн. наук
(ИОНХ НАН Беларуси, г. Минск)

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ РПУП «ЗАВОД ГАЗЕТНОЙ БУМАГИ»

Одним из основных видов производственной деятельности РПУП «Завод газетной бумаги» является производство бумаги (газетной, тонированной, легкой мелованной, оберточной, для печати, офсетной, бумаги-основы для декоративных облицовочных материалов); переработка древесины хвойных пород (распиловка и строгание древесины, производство клееного бруса и строганых изделий, каркасно-панельных домов, домов из клееного бруса и комплектов малых архитектурных форм, а также гранул древесных топливных (пеллет).

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности характеризуются потреблением большого количества воды на всех стадиях технологического процесса.

Для подготовки технической воды используются:

– известь гидратная – для приготовления известкового молока, используемого для декарбонизации и коррекции рН среды в установке «Флокопак»;

– коагулянт хлорид (сульфат) железа (III) – для дестабилизации коллоидных частиц, способных седиментировать;

– флокулянт анионный на основе полиакриламида – для образования крупных флокул.

Подготовка технической воды осуществляется на установке типа Флокопак.

В процессе водоподготовки образуется осадок коагуляции водоподготовки, который в настоящее время вывозится на хранение на иловые площадки предприятия. Общий объем образования осадка составляет до 645 т/год.

В воздушно-сухом состоянии представляет собой гомогенную рассыпчатую массу. Данный осадок характеризуется размерами частиц около 20 мкм. В воздушно-сухом состоянии рассыпчатый.

Содержание элементов в образцах железосодержащих осадков коагуляции проводили для образца, взятого с предприятия (в мас. %): кислород – 40,95; магний – 2,38; кремний – 0,91; кальций – 39,99; железо – 3,06; углерод – 12,71.

Исходя из состава, осадок представляет собой преимущественно карбонат кальция и гидроксид железа, с примесями кремния и магния.

На основании проведенного литературного обзора в качестве альтернативных вариантов использования осадка коагуляции можно предложить для рассмотрения следующие:

- регенерация извести;
- производство гипса;
- почвоулучшающая добавка вместо доломита для подщелачивания кислых почв.

Для дальнейших исследований выбрали направление комплексной переработки осадка коагуляции в гипс.

Исходя из состава осадка коагуляции можно предложить его обработку товарной серной кислотой или отработанной образующейся на ряде производств.

Таким образом, можно получать гипсовый камень и раствор (фильтрат) содержащий сульфат железа с примесями. Данный раствор сульфата железа можно использовать в качестве коагулянта вместо покупного для осветления природных вод в процессе водоподготовки. Альтернативным вариантом получения коагулянта может быть рассмотрена нейтрализация фильтрата отходом, который далее будет использоваться на стадии приготовления суспензии в основной технологической схеме.

В результате проведенных исследований было получено 2 продукта: осадок – гипсовый камень, фильтрат – 5-7% раствор сульфата железа. Элементный состав полученного гипсового камня включает примесь 1,43 мас.% железа. Это позволяет сделать заключение, что полученный гипс соответствует сорту 1 согласно ГОСТ 4013-2019.

Исследования фильтрата в качестве коагулянта показали несколько худшие результаты при сравнении с чистым коагулянтом, что можно объяснить влиянием находящихся в нем сульфатов магния, кальция и натрия.

Полученные экспериментальные результаты по синтезу гипсового камня послужили основой для разработки технологии его промышленного производства.

БИОКОМПСТИРОВАНИЕ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ЗАО «ВИТЭКС»

Косметическая отрасль Республики Беларусь насчитывает около 50 предприятий. Закрытое акционерное общество «Витэкс» одно из ведущих предприятий Беларуси по производству косметических средств и товаров бытовой химии, положившее начало развитию косметической отрасли в республике и успешно работающее на рынке более 30 лет.

В 2009 году на предприятии ЗАО «Витэкс» было открыто производство экстрактов из высококачественного растительного сырья, выращиваемого на землях сельскохозяйственных предприятий. Именно это органическое сырье используется при производстве косметической продукции.

Технология производства экстрактов характеризуется образованием отходов растительного сырья, которые представляют собой измельченные растительные остатки с размерами частиц около 3-5 мм пропитанные пропиленгликолем либо растительным маслом. На сегодняшний день данные отходы не используются, и вывозятся их на полигон ТКО. Данный способ обращения с отходами неприемлем. Наиболее целесообразным способом обращения с данными отходами является их компостирование.

Проведенные исследования предусматривали анализ состава данных отходов по таким показателям как влажность, зольность, рН солевой вытяжки, содержание органического вещества, азота нитратного, валового фосфора и калия. Результаты показали, что содержание питательных элементов в отходах недостаточное, что требует корректировки перед составлением компостируемой композиции.

Компостирование отходов показало, что скорость биодegradации данных отходов очень низкая. Связано это с содержанием в этих отходах пропиленгликоля либо растительного масла. Поэтому на следующем этапе перед компостированием проводили подготовку отходов, которая включала в себя несколько вариантов: прессование и прессование с последующей промывкой отходов. Это позволило увеличить скорость процесса компостирования в несколько раз. Процесс проходил с участием различных микроорганизмов, смена которых была видна визуально.

Проведенные исследования полученных компостов показали, что они могут использоваться в качестве почво- и структура-улучшающей добавки, удобрения и в составе почво-грунта в сельском хозяйстве, зеленом строительстве, при рекультивации нарушенных земель.

УДК 621.357

А. В. Лихачева, доц., канд. техн. наук; Х. Д. Розыкулыев, студ.
(БГТУ, г. Минск)

СИСТЕМА ОБРАЩЕНИЯ С ЛАБОРАТОРНЫМИ ОТХОДАМИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

В Республике Беларусь в соответствии с действующим Классификатором отходов [1] 40 наименований отходов относятся к лабораторным. Это отходы, образующиеся в медицинских лабораториях, в производственных лабораториях, которые контролируют качество текстильной продукции, а также лабораторные отходы, образующиеся в научных, учебных и других лабораториях. В Республике Беларусь функционирует всего 3 объекта по использованию отходов [2]. При этом от сторонних организаций принимаются только лакокрасочные отходы. Из 40 видов отходов, образующихся в стране, на объектах по использованию используется только 4 вида.

В Республике Беларусь функционирует 352 объекта по обезвреживанию отходов. Обезвреживанием отходов занимается 63 организации, при этом только 5 из них принимает отходы от других организаций, остальные обезвреживают только собственные отходы. Но, на обезвреживание принимаются от сторонних организаций только 3 вида отходов. Собственники объектов по обезвреживанию обезвреживают только 5 видов отходов из 40, образующихся в стране. В основном это медицинские лабораторные отходы.

Таким образом, около 90% всех видов лабораторных отходов, образующихся в стране, не используются и не обезвреживаются.

В выполненной работе показано, что некоторые лабораторные отходы могут рассматриваться как альтернативные источники сырьевых ресурсов. Так, показано, что такой лабораторный отход, как ацетат никеля, являющийся реактивом с истекшим сроком годности, может использоваться для получения оксида никеля, который применяется в качестве катализаторов, как зелёный пигмент для стекла, керамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. ОКРБ 021-2019 Общегосударственный классификатор Республики Беларусь. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь. – Утвержден Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 9.09.2019 г. №3-Т. – 88 с.

2. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Реестры объектов использования, хранения, захоронения и обезвреживания отходов. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/ru/objecty-ru/>. Дата доступа: 2.01.2021.

УДК 621.357

А. В. Лихачева, доц., канд. техн. наук; Д. В. Качинская, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ПЕРЕРАБОТКА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ОАО «КЕРАМИКА»

В технологических процессах обработки металлов на многих предприятиях образуется железная окалина.

Объектом исследования в данной работе является железная окалина, образующаяся при сварке металла на ОАО «Керамика».

В соответствии с Классификатором отходов, образующихся в Республике Беларусь, исследуемый отход имеет следующее наименование: смесь железной окислы и сварочного шлака. Он относится к четвертому классу опасности.

Окалина представляет собой пластинки различного размера, твердые, неправильной формы, коричневого цвета с металлическим блеском, без запаха, нерастворимые в воде. Химический состав отходов, % масс.: $Fe_{\text{общ}}$ – 61-72,4, SiO_2 – 0,22-2,70, $CaO \leq 2,02$, $Al_2O_3 \leq 0,40$, MgO – 0,17-4,07, MnO – 0,03-0,86, C – 0,3-4,1, S – 0,011-0,12, P – 0,007-0,03, Ni – 0,025-0,05.

На данный момент отход на предприятии не перерабатывается, находится на временном хранении на предприятии для дальнейшего захоронения на ГП «Спецавтобаза» г. Витебска. В результате проведенных исследований были получены материалы для очистки сточных вод: коагулянт на основе хлорида железа и магнитные пигменты.

Для определения эффективности использования полученного коагулянта для очистки сточных вод, исследования проводили на примере очистки сточных вод ОАО «Керамика». Установлено, что оптимальная доза коагулянта составляет 100 мг/дм^3 , при этом была достигнута эффективность очистки 76%.

Магнитные сорбенты получали по двум вариантам, отличающихся обработкой отхода соляной и серной кислотами. Сорбционную емкость магнитных сорбентов определяли по ионам меди (II). Сорбционная емкость сорбента полученного при обработке отхода соляной кислотой – 0,16 г/г, а серной кислотой – 0,17 г/г. Эффективность очистки сточных вод от ионов меди составляет не менее 85%.

Данное направление исследований необходимо продолжить, особенно оно интересно тем, что магнитные сорбенты получены из железосодержащего отхода. В научно-технической литературе представлена информация о получении сорбентов только из чистых химических веществ.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ АЗОТА И ФОСФОРА ИЗ ИЛОВЫХ ВОД В РЕАКТОРЕ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ

Избыточное поступление азота и фосфора со сточными водами в поверхностные водные объекты является ключевым фактором антропогенного эвтрофирования.

Поступление соединений азота, прежде всего нитратов, нитритов и азота аммонийного, в водные объекты приводит к серьезному отрицательному воздействию на организм человека и окружающую среду [1].

Зависимость сельского хозяйства от использования фосфорных удобрений, сокращение количества богатых фосфором горных пород, а также зависимость от их импорта стимулирует развитые страны к повышению эффективности использования фосфорсодержащего сырья и поиску альтернативных его источников. Фосфорсодержащие горные породы в странах Европейского союза на наднациональном уровне включены в перечень стратегического сырья [2]. По некоторым подсчетам ежегодно 15–20% добытого фосфора попадает в сточные воды [3].

Это делает извлечение азота и фосфора на очистных сооружениях канализации одним из наиболее рациональных путей их возврата в хозяйственный оборот. Сокращение поступления этих биогенных элементов со сточными водами на очистных сооружениях канализации приводит к накоплению их в осадках сточных вод. Соответственно наиболее простым вариантом, обеспечивающим рециклинг ценных элементов, является использование осадков в качестве органоминеральных удобрений. Однако такое использование осадков сточных вод может быть ограничено ввиду их многокомпонентного состава. В крупных промышленных городах в их состав входят тяжелые металлы, стойкие органические загрязнители и др.

Вместе с тем, иловые воды, образующиеся в результате обработки данных отходов, характеризуются значительными концентрациями азота аммонийного и фосфора фосфатов. Например, концентрации азота аммонийного и фосфора фосфатного в фугате от обезвоживания осадков сточных вод, прошедших анаэробное сбраживание, могут превышать соответственно 400 и 120 мг/дм³ [4]. Соответственно возврат данных вод в приемную камеру очистных сооружений приводит к значительному росту нагрузки по азоту и фосфору.

Особый интерес представляет изучение извлечения азота и фосфора из возвратных потоков очистных сооружений с использованием

обожженного доломита в реакторе взвешенного слоя. Поэтому целью данной работы было оценить эффективность извлечения азота и фосфора из иловых вод обожженным доломитом в реакторе взвешенного слоя.

Для достижения поставленной цели была спроектирована и смонтирована опытная лабораторная установка (рисунок). Модельная иловая вода из накопителя (1) перистальтическим насосом (2) перекачивается в центральную трубу реактора взвешенного слоя (3). В качестве сорбента в реакторе использовали обожженную при температуре 700°C доломитовую муку. Расход перекачиваемых в реактор иловых вод подбирали таким образом, чтобы скорость восходящего потока компенсировала гидравлическую крупность обожженного доломита, загружаемого в реактор. Очищенная вода отводится из верхней части реактора (3) в резервуар накопитель (4). Отработанный доломит, осевший в нижней части реактора, отводится через штуцер в резервуар накопитель (5).

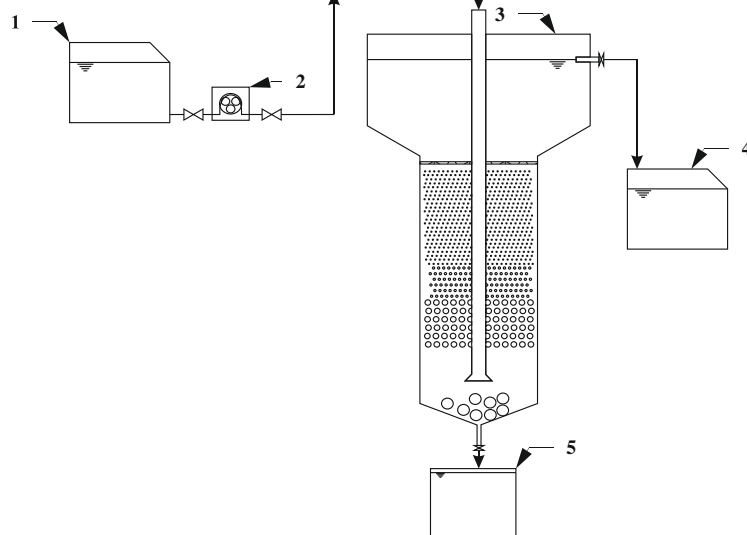


Рисунок – Схема опытной лабораторной установки

Реактор взвешенного слоя был сконструирован с нисходяще восходящим потоком жидкости. Он разделен на две части контактную и зону осветления, объемы которых соотносятся между собой в соотношении 1 : 3 соответственно.

В ходе испытаний работы установки контролировали концентрации фосфатов и азота аммонийного на в накопителях (1) и (4). Установлено, что эффективность извлечения фосфора фосфатов и азота аммонийного составляла 80 % и 64,2 % соответственно.

Таким образом, в работе показано, что извлечение азота и фосфора из возвратных потоков очистных сооружений канализации обожженным доломитом в реакторе взвешенного слоя является может быть высокой эффективностью

ЛИТЕРАТУРА

1. Sengupta, S., Nawaz, T., Beaudry, J. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater // *Curr. Pollution Rep.* – 2015. – Vol. 1. – P. 155–166.
2. The list of critical raw materials for the EU [Электронный ресурс] Режим доступа: – <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6> – Дата доступа 30.01.2021.
3. Clift R., Shaw H. An industrial ecology approach to the use of phosphorus // *Procedia Engineering.* – 2012. – Vol. 46. – P. 39–44.
4. Испытания различных режимов сбрасывания сточных вод Минской очистной станции на полупромышленной пилотной установке / В. Н. Марцуль [и др.] // *Передовые технологии в системах водоотведения населенных мест: материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 12-13 февраля 2020 г.* – Минск : БГТУ, 2020. – С. 119–122.

УДК 628.3(0.75.8)

И.В. Войтов, проф., д-р техн. наук; В.Л. Еловик, асп.
(БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК КОНТРОЛЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Вопросы, касающиеся рационального использования энергетических ресурсов, особенно в условиях постоянного роста стоимости энергоносителей, приобретают с каждым годом все большую и большую актуальность. Доля затрат на энергоносители, в частности на электроэнергию, в структуре себестоимости конечной продукции неуклонно стремятся к росту. Благодаря этому в производственных процессах все большее и большее распространение получают энергосберегающие технологии и оборудование. Так в качестве одной из потенциальных энергосберегающих технологий, за последние 15-20 лет, получили довольно широкое внедрение частотно регулируемые приводы (ЧРП) насосных агрегатов, предназначенных для производственного водоснабжения. Поскольку вода является универсальным ресурсом для многих отраслей промышленности, то и рассматриваемая в данной статье проблематика является общей для всех предприятий, использующих в больших количествах воду на технические и технологические нужды.

Частотное регулирование режимов работы насосных агрегатов позволяет в идеале насосному агрегату подавать в производственную сеть именно столько воды и с таким давлением, сколько требуется для конкретного техпроцесса. Тем самым за счет ликвидации излишнего

давления (неизбежно образующегося при стандартных способах регулирования) в теории достигается экономия электроэнергии. Но для достижения ожидаемого эффекта недостаточно лишь одного внедрения ЧРВ в систему подачи воды (насосный агрегат, насосную установку или станцию). Без увязки с системой распределения воды (водопроводной сетью предприятия) невозможно добиться сколько-либо значимого эффекта. Не редки случаи, когда внедрение ЧРП не только не позволяло получить ожидаемое снижение потребления электроэнергии, но и приводило к ее увеличению.

Для достижения максимального эффекта от внедрения ЧРП помимо соответствующего оснащения насосных агрегатов необходимо предусматривать оптимизацию системы автоматического управления с обоснованием размещения точек контроля давления в водопроводной сети предприятия. Очевидно, что затраты электроэнергии на транспортирование воды будут минимально возможными, если у всех потребителей в водопроводной сети предприятия будет давление, соответствующее требованиям технологического регламента. Не больше и не меньше. Однако, согласно элементарным законам гидравлики, такие условия труднодостижимы по экономическим соображениям – слишком велики капитальные затраты. Поддерживать заданное давление возможно только в определенных точках водопроводной сети называемых диктующими. С точки зрения режима управления подачей воды в водопроводную сеть под диктующей точкой подразумевается такое место водопроводной сети, поддерживая заданное давление, в котором автоматически обеспечивается давление не менее требуемого в остальной водопроводной сети. Как правило диктующей точкой является наиболее гидравлически удаленная точка сети и давление у потребителей между диктующей точкой и насосной станцией будет выше требуемого в сторону возрастания к насосной станции. Таким образом, при поддержании требуемого давления $H_{ст}$ в диктующей точке, обеспечивается оптимальный режим работы регулируемого насоса подающего воду в водоразборную сеть, когда все режимные точки при переменном водопотреблении от минимального q_{min} до максимального q_{max} лежат на гидравлической характеристике водоразборной сети $Q-H$ кривая 1-3 (рисунок 1). При этом напор, развиваемый регулируемым насосом H , складывается из непосредственного обеспечения требуемого давления в диктующей точке $H_{ст}$ и давления на компенса-

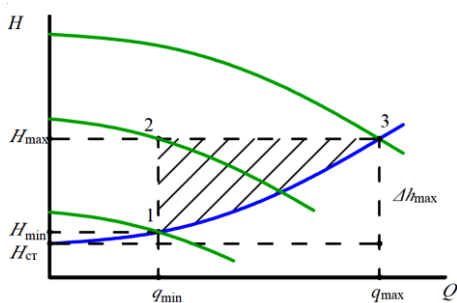


Рисунок 1 – Зона превышения давления

ции. При этом напор, развиваемый регулируемым насосом H , складывается из непосредственного обеспечения требуемого давления в диктующей точке $H_{ст}$ и давления на компенса-

цию гидравлических сопротивлений водопроводной сети Δh при водопотреблении q от q_{min} до q_{max} .

$$H = H_{ст} + \Delta h, \quad (1)$$

где

$$\Delta h = S \cdot q^2 \quad (2)$$

S – коэффициент гидравлического сопротивления водоразборной сети.

Таким образом при регулировании режимов работы насоса система подачи воды автоматически адаптируется под состояние системы распределения воды обеспечивая оптимальные затраты на подаче и распределение воды по водопотребителям.

Несомненно, определение диктующей точки сопряжено с необходимостью гидравлического расчета водоразборной сети, анализа распределения водопотребления, определение распределения водопотребления по времени (часовое, посменное, суточное, годовое). Вероятно именно этот факт, в дополнение к неочевидности преимуществ в регулировании по давлению в диктующей точке водоразборной сети, послужил тому, что все чаще и чаще при проектировании и разработке схем АСУ работой насосного оборудования с ЧРП допускается упрощение в виде управления режимами регулируемого насоса по давлению на напорном коллекторе насосной станции.

При регулировании режимов работы насосного оборудования по давлению в напорном коллекторе напор развиваемый насосом с ЧРП H_k задается постоянным и равным сумме требуемого давления в диктующей точке $H_{ст}$ и давления на компенсацию гидравлических сопротивлений водопроводной сети Δh_{max} при максимальном водопотреблении q_{max} .

$$H_k = H_{ст} + \Delta h_{max} \quad (3)$$

Таким образом режимные точки регулируемого насоса при переменном водопотреблении от минимального q_{min} до максимального q_{max} лежат на горизонтальном отрезке 2-3 (рисунок 1). Область, образованная отрезками 1-2, 2-3 и кривой 1-3 ограничивает зону избыточного давления и соответственно избыточного расхода электроэнергии. При этом легко определить, что потенциал экономии электроэнергии пропорционально зависит от отношения максимально развиваемого напора регулируемым насосом H_k к требуемому давлению в диктующей точке $H_{ст}$. Чем больше данное отношение, тем выше потенциал экономии электроэнергии при регулировании режимов работы насоса с ЧРП по давлению в диктующей точке.

И.В. Войтов, проф., д-р техн. наук;
П.М. Гудинович, асп.; В.Л. Еловик, асп. (БГТУ, г. Минск)

БИОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ АРТЕЗИАНСКИХ ВОД ДЛЯ НУЖД ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В современном мире складывается устойчивая тенденция на внедрение различных энергоэффективных технологий во многих отраслях промышленности. Их применение позволяет снизить не только эксплуатационные затраты и издержки, но и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции. Не исключением является и внедрение энергоэффективных технологий водоподготовки с низкими эксплуатационными затратами на собственные нужды. Ежегодно растет спрос на обеспечение промышленных предприятий качественной водой с различной степенью очистки не зависимо от сферы деятельности будь то пищевая, химическая, фармацевтическая, легкая, тяжелая и др.

Ввиду особенностей химического состава подземных вод на территории нашей республики основными показателями, требующими снижения, являются повышенное содержание растворенных железа и марганца. Даже в случаях необходимости получения воды с низким содержанием солей жесткости или и вовсе деионизированной воды, предварительное удаление из воды железа и марганца позволяет значительно сократить эксплуатационные затраты на использование в качестве доочистки ионообменных или мембранных технологий, а также повысить надежность и эффективность работы данного оборудования. Одно из приоритетных направлений по очистке подобных вод является биохимические технологии удаления железа и марганца. Как показывает многолетний опыт, технология биохимической очистки подземных вод позволяет достичь беспрецедентно низких эксплуатационных затрат за счет малой потребности в воде на собственные нужды, низком удельном энергопотреблении и полной автоматизации технологического процесса.

Станции обезжелезивания и деманганации.

Безнапорные станции с тяжелой загрузкой. Железобактерии в процессе своего развития образуют на поверхности зерен фильтрующего материала бактериальную пленку. Она может развиваться как в толще загрузки, например, щебеночной, так и преимущественно на ее поверхности при использовании песка. Конструктивно такая технология может реализовываться в традиционных открытых фильтрах из

железобетона, металла (рисунок 1) или полимерных материалов. Особое внимание при этом следует обращать на кислородный режим процесса и промывку фильтрующего материала.

Такие технологии рекомендуется использовать при относительно простом составе воды. Их легко реализовать путем реконструкции действующих станций обезжелезивания, работающих по методу упрощенной аэрации. [1, 2].

Безнапорные станции с плавающей загрузкой. Такие станции могут быть одно- и двухступенчатые. Первые включают приемную камеру и фильтры с плавающей загрузкой. Они рекомендуются при относительно не сложном составе обрабатываемой воды, но требующей усиления аэрационно-дегазационных процессов (рисунки 2, 3).

Двухступенчатая схема состоит из нескольких блоков, включающих биореактор и три-четыре самопромывающихся фильтров с плавающей загрузкой, выполняющих функцию биофильтров. Она рекомендуется при сложном составе подземных вод (низкое значение pH, высокая окисляемость, наличие аммония, высокое содержание железа, CO₂, и др.). На первой ступени обеспечивается интенсивная управляемая аэрация и дегазация поступающей воды, развитие биопленки на поверхности полимерной загрузки и биологическое окисление и удаление основной массы железа.

На второй ступени происходит доокисление двухвалентного железа и удаление выносимых из биореактора продуктов биоокисления [3, 4].

Все корпусные элементы, загрузка и коммуникации станций такого типа выполняются из полимерных конструкционных материалов с отдельными элементами из нержавеющей стали. Отсутствие промежуточных перекачек, промывных насосов, химических реагентов и полная автоматизация технологических процессов обеспечивают уникально низкое удельное энергопотребление (0,005–0,01 кВт*ч/м³) и минимальные эксплуатационные затраты. Объем промывных вод не превышает 1-1,2% от объема очищаемой воды.

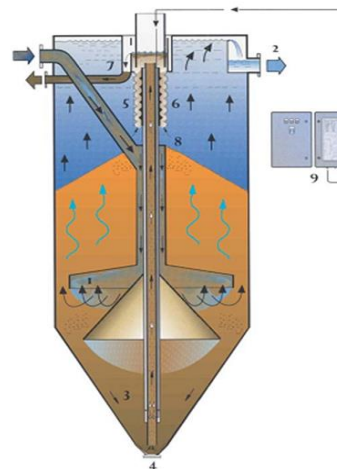


Рисунок 1



Рисунок 2

Напорные станции. По технологическому принципу работы такие станции не отличаются от безнапорных. Фильтры изготавливаются



Рисунок 4

из металла с усиленным антикоррозионным покрытием (рисунок 4). В качестве загрузки (поддерживающего слоя) используется кварцевый песок. Для быстрого ввода станции в эксплуатацию используется добавка БАЗ из фильтров других станций.

Отличительной особенностью данного типа станций является оригинальная система эжекторной аэрации, обеспечивающая стабильное соотношение вода-воздух и равномерное распределение воды по всем фильтрам независимо от гидравлического сопротивления загрузки [5]. Выравнивание и стабилизация скорости фильтрования и концентрации растворенного кислорода наряду с другими оригинальными конструктивными решениями повышают эффективность удаления железа, увеличивают фильтроцикл и снижают расход промывной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седлуха С.П., Софинская О.С. Биологический метод очистки подземных вод от железа // Вода и экология: проблемы и решения. – 2001. № 1 – С. 13–21.
2. Седлуха С.П. Способ обезжелезивания подземных вод // Патент ВУ 1416 от 1996.
3. Седлухо Ю.П., Иванов С.А., Еловик В.Л. Биологическая очистка подземных вод от железа, марганца и сероводорода – опыт Беларуси // Вода Magazine – 2016, № 7(107) – С. 10–15
4. Седлухо Ю.П. Влияние аэрационно-дегазационных процессов на свойства подземных вод и технологии их биологического обезжелезивания и деманганации // Вода. – 2012, № 7–8(181).
5. Седлуха С.П., Иванов С.А. Установка для обезжелезивания подземной воды // Патент ВУ 10695 от 2008.
6. Виноградский С.Н. Микробиология почвы: проблемы и методы. Пятьдесят лет исследований. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – 792 с.
7. Холодный Н.Г. Железобактерии. – М.: Изд-во АН СССР, – 224 с.
8. Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. Экология водных микроорганизмов. – М.: Наука, 1977. – 288 с.

9. Терентьев В.И. Павловец Н.М. Биотехнология очистки воды: в 2-х ч. Ч.1. – СПб.: Гумманистика, 2003. – 272 с.

10. Degremont. Технический справочник по обработке воды. В 2 т.– СПб.: Новый журнал, 2007.

11. Журба М.Г. и др. Биохимическое обезжелезивание и деманганизация подземных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006, № 9. – С. 17–23.

УДК 606:628

М. Г. Коваль доц., канд. техн. наук
(ЧГТУ, г. Черкассы, Украина)

СПОСОБЫ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ПРИРОДНЫМИ СОРБЕНТАМИ

Проблема рационального использования природных ресурсов, экологической безопасности и охраны окружающей среды является чрезвычайно актуальной и требует разработки новых технологических процессов химической промышленности для снижения воздействия на экосистему.

Промышленные сточные воды, в частности текстильно-красильного производства, содержат различные органические красители, вспомогательные вещества с высоким уровнем токсичности и, следовательно, опасны для окружающей среды [1].

Одной из перспективных технологий очистки промышленных сточных вод является адсорбционная очистка природными сорбентами. В работе исследовались два способа очистки сточных вод реального производства, содержащих органические текстильные красители: с помощью электрической мешалки и в колонке ионитового типа бентонитовыми и цеолитовыми глинами. Бентонитовые глины – Дашуковское месторождение (Черкасская обл., Украина) [2]. Цеолит (сокирнит) – Сокирницкое месторождение Закарпатской области (Украина) [3].

Перед использованием природных сорбентов в процессах водочистки был проведен ряд подготовительных работ, а именно: просеивание, промывка, сушка, термическая активация. Обработка глины проводилась в муфельной печи типа СНОЛ - 1,6.2,5.1/9 - И4 путем прокаливании при температуре 450°C в течение 4,5 ч. Прожаренные цеолит и бентонит охлаждались без доступа воздуха.

Оценка цвета сточной воды осуществлялась спектрофотометрическим методом, а измерение мутности растворов с помощью мутномера CyberScan TB1000. Степень очистки определялась отношением

оптической плотности очищенной воды к исходной сточной воде по каждому исследованию.

Результаты анализа очистки сточной воды бентонитом с использованием электрической лопастной мешалки и в колонке ионитового типа представлены на рисунках 1, 2. Согласно рисунку 1, степень очистки сточной воды термически активированным бентонитом составляет 38,9%, мутность – 97,64, рН – 6,65. Согласно рисунку 2, степень очистки сточной воды термически активированным бентонитом составляет 21,1%, мутность – 75,8, рН – 6,77.

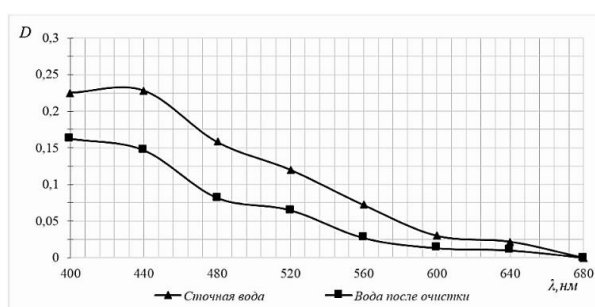


Рисунок 1 – Зависимость оптической плотности от длины волны сточной и очищенной воды бентонитом (способ использования электрической мешалки)

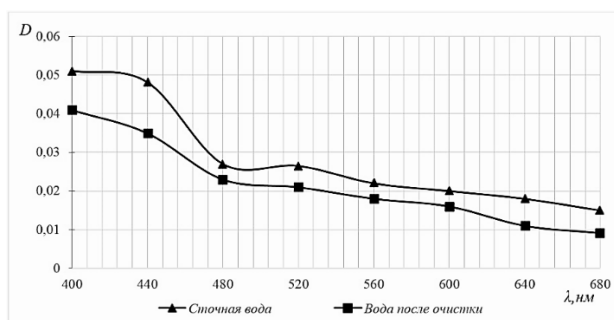


Рисунок 2 – Зависимость оптической плотности от длины волны сточной и очищенной воды бентонитом (способ использования колонки ионитового типа)

Результаты анализа очистки сточной воды цеолитом с использованием электрической мешалки и в колонке ионитового типа представлено на рисунках 3, 4. Согласно рис. 3, степень очистки сточной воды термически активированным цеолитом составляет 43%, мутность 62,9 МФО, рН 6,65. Согласно рисунку 4, степень очистки сточной воды термически активированным цеолитом составляет 71,6%, мутность 24,5 МФО, рН 6,76.

Использование электрической мешалки приводит к разрушению гранул глин, что обуславливает значительную мутность очищенной воды. С целью улучшения адсорбционных свойств исследуемых глин,

целесообразно осуществить химическую активацию глин и исследовать возможность их использования в технологии очистки промышленных сточных вод.

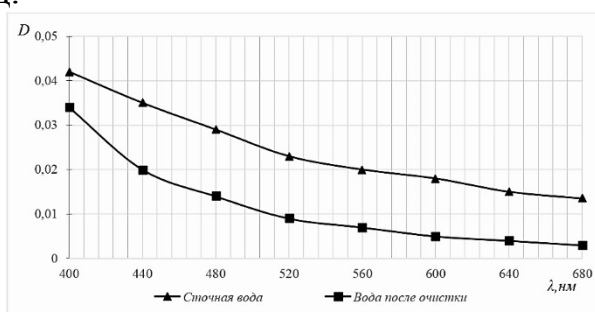


Рисунок 3 – Зависимость оптической плотности от длины волны сточной и очищенной воды цеолитом (способ использования электрической мешалки)

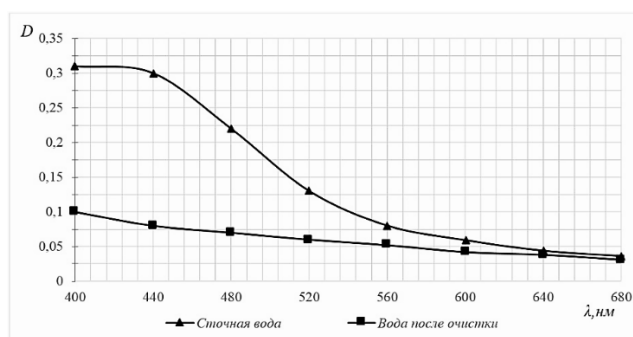


Рисунок 4 – Зависимость оптической плотности от длины волны сточной и очищенной воды цеолитом (способ использования колонки ионитового типа)

Таким образом, представленные исследования показали, что термически активированные цеолиты и бентониты, обладают высокими адсорбционными свойствами в процессе очистки промышленных сточных вод и могут быть применены как для модернизации существующих технологий очистки воды, так и для разработки перспективных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евлантьев С.С., Войтюк А.А., Сахарова Н.А. Исследование методов очистки сточных вод текстильного производства от красителей // Научный потенциал регионов на службу модернизации. – АИСИ, 2012.– №2 (3). – С. 111–113.
2. Овчаренко Ф.Д., Кириченко Н.Г., Островская А.Б., Довгий М.Г. Черкасское месторождение бентонитовых и палыгорскитовых глин, К: Наукова думка, - 1966. - 126 с.
3. Цеолит. [Электронный ресурс] // Описание свойств и областей применения цеолита. [сайт]. [2018] [http: www.ceolit.smila.com/op.htm](http://www.ceolit.smila.com/op.htm)

А. А. Меженцев, доц., канд. техн. наук;
Г. А. Бурак, доц., канд. техн. наук;
В. В. Гиринский, асп. (БНТУ, г. Минск)

СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ФОСФОГИПСА

Утилизация промышленных отходов является одним из радикальных решений проблемы ликвидации загрязнения окружающей среды и сохранения равновесия между экологической средой и промышленностью. В связи с этим большое значение приобретает использование промышленных отходов в качестве вторичного сырья. Одним из наиболее перспективных направлений утилизации промышленных отходов является использование их в производстве строительных материалов, что позволяет на 40% удовлетворить потребности в сырье и снизить расход топлива.

Для снижения удельных затрат топлива и энергии весьма привлекательным является использование фосфогипса в качестве вяжущего без его теплообработки. Фосфогипс содержит от 80 до 90% гипса и может быть отнесен к гипсовому сырью. Высокая дисперсность фосфогипса позволяет исключить из технологического процесса дробление и грубый помол.

Ранее проведенными исследованиями было установлено, что получение вяжущих изделий с использованием в качестве исходного материала активированного фосфогипса возможно при использовании процессов прессования. Наиболее эффективной технологией производства стенового материала является способ прессования полусухих смесей.

Применение данной технологии позволяет использовать уже существующее производственное оборудование на кирпичных заводах, а также дает возможность получать строительные изделия с прочностью достаточной для использования их в нежилых помещениях для внутренней отделки.

Анализ литературных данных и выполненные ранее исследования показали, что образование кристаллизационной структуры вяжущего материала возможно при выполнении следующих условий:

- во-первых, система должна быть метастабильной, т.е. концентрация растворенного вещества (CaSO_4) в воде должна быть больше растворимости его гидрата;
- во-вторых, частицы дисперсной фазы (ФГ) должны находиться на расстоянии, при котором возможно образование кристаллизационных контактов между ними.

Установлено, что при увеличении пересыщения раствора возрастает расстояния между срастающимися частицами гидрата при котором возможно образование кристаллизационного сростка.

Поскольку, из-за высокого водосодержания сблизить частицы фосфогипса на расстояние, необходимое для образования устойчивого кристаллизационного сростка при прессовании полусухих смесей не удастся, то следовательно, для таких систем целесообразно повысить пересыщение жидкой фазы относительно двуводного фосфогипса, что достигается введением в систему некоторого количества полуводного фосфогипса. Установлено, что пространственная кристаллизационная структура с достаточной прочностью образуется при содержании полуводного фосфогипса не более 1-% от массы смеси.

После затворения вяжущего водой концентрация вещества в растворе быстро достигает значения, при котором возможно образование устойчивых зародышей новой фазы.

В связи с тем, что фосфогипс имеет кислую реакцию среды, то при использовании его в качестве основного компонента сырьевой смеси необходимо его нейтрализация. В качестве нейтрализующего агента наряду с известью использовался шлам станций химводоподготовки.

Ежегодно на ТЭС образуется около 7 тыс. тонн шлама ХВО влажностью ~ 90%. Шлам ХВО (отход 5 класса опасности) – продукт известкования и коагуляции природной воды.

Высушенный шлам представляет собой тонкодисперсный порошок. С помощью микроскопического метода определено, что средние и крупные зерна (5–20 мкм) представлены CaCO_3 и MgCO_3 , зерна извести – 2,5–5 мкм. Частицы $\text{Fe}(\text{OH})_3$ имеют размер до 1,5 мкм. Частицы размером от 5 до 100 мкм – механические примеси кварца и кусков глины. Химический состав шлама приведен в таблице.

Таблица – Состав шлама химической водоподготовки

CaCO_3	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$	SiO_2	Органические примеси
65–80%	5–10%	2–5%	2–5	3–4%	5

Было установлено, что при содержании в шламе 80% CaCO_3 , требуемое количество в смеси с фосфогипсом для достижения нейтральной среды составляет 7–8% от массы фосфогипса.

Для определения оптимального водотвердого соотношения смеси изучалось его влияние на объем и характер пор, а также плотность получаемого материала.

Образцы изготавливались путем прессования смесей различного состава при давлениях 5, 10, 20 МПа. Затем определяли плотность свежепрессованных образцов и образцов после хранения на воздухе в течение 7 суток.

В результате было установлено, что с увеличением влажности смеси плотность прессованных образцов возрастает до определенного предела, после которого плотность начинает уменьшаться, что объясняется заполнением межзернового пространства водой.

При последующем увеличении влажности смеси наблюдается снижение плотности свежепрессованных образцов.

На основании проведенных исследований установлены оптимальные значения водотвердого соотношения и давления прессования, при использовании которых получается изделие с максимальной плотностью [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Игленкова, М.Г. Физико-химические закономерности получения композиционных материалов на основе фосфогипса автореф. дис. ... канд. хим. наук / М.Г. Игленкова. – Саратов. – 2013.

УДК 691.311

В. Н. Яглов, проф., д-р хим. наук;
В. В. Гиринский, асп. (БНТУ, г. Минск)

МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФОСФОГИПСА, ПОЛУЧАЕМЫЕ СПОСОБОМ ПОЛУСУХОГО ПРЕССОВАНИЯ

С точки зрения экономики, снижения удельных затрат топлива и энергии весьма привлекательным является использование фосфогипса без его перевода путем обжига в вяжущее. Установлено, что получение изделий на основе фосфогипса возможно при использовании давления прессования в сочетании с различными способами активации фосфогипса (нейтрализация, измельчение, введение добавок и др.). Прочность получаемых изделий может достигать высоких значений при использовании способа фильтрационного прессования. Получены изделия с прочностью на сжатие до 30 МПа. Однако, способ фильтрпрессования связан с применением пресс-форм сложной конструкции. Повышенное содержание воды в формовочных смесях увеличивает время прессования и снижает производительность оборудования. В процессе производства появляются отходы – растворы фильтрации.

С точки зрения эффективности технологии производства строительного материала интерес представляет способ прессования полусухих смесей. Применение технологии полусухого прессования дает возможность получать изделия с достаточно высокой прочностью. Организация производства таких изделий не требует больших затрат, кроме того, возможно использование оборудования, выпускаемого отечественными предприятиями машиностроения для прессования различных изделий. Возможно также использование при этом технологических линий на заводах по производству силикатного и керамического кирпича.

Рассмотрен механизм твердения смесей на основе дигидрата и полугидрата сульфата кальция в условиях полусухого прессования. Выполненные экспериментальные исследования показали, что возникновение кристаллизационной структуры может происходить при выполнении следующих условий: во-первых, частицы дисперсной фазы (ДГи ПГ) должны находиться на достаточно близком расстоянии друг от друга, при котором возможно образование кристаллизационных контактов между ними, во-вторых, концентрация растворенного сульфата кальция в воде должна быть больше растворимости его гидрата, т. е. система должна быть метастабильной.

При прессовании сблизить частицы исходного фосфогипса на расстояние, необходимое для образования кристаллизационной структуры, не удается, что обусловлено высокой влажностью фосфогипса и невозможностью использования высоких давлений прессования. Следовательно, для таких систем необходимо повысить пересыщение жидкой фазы относительно двуводного гипса, т.е. выполнить второе условие возникновения структуры. Этого можно достичь введением в систему 15-20% полуводного гипса, полученного предварительно из фосфогипса. После затворения полученной смеси ди- и полугидрата водой концентрация вещества в растворе быстро возрастает до значения, при котором возможно образование устойчивых зародышей новой фазы.

Установлено, что нейтрализованный фосфогипс принимает активное участие в формировании первичной структуры. При наличии в системе дигидрата (ДГ) пространственная кристаллизационная структура с достаточно высокой прочностью образуется даже при небольшом содержании ПГ (15-20%).

Для изучения второй стадии процесса (безгидратационного твердения) затвердевшие образцы хранились в течение месяца при $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности атмосферы около $60 \pm 10\%$. Из результатов экспериментов следует, что прочность затвердевших образцов

продолжает увеличиваться, хотя процесс гидратации вяжущего закончился в первые сутки твердения. В течение времени хранения образцов с 7 до 28 сут. прочность образцов состава ДГ: ПГ= 80:20 увеличивается на 8 – 10%.

Проведенные исследования показали, что наиболее эффективной нейтрализующей добавкой после извести (1-2%) является шлам химводоподготовки. При содержании в шламе 20% CaCO₃, что соответствует ее средней активности, требуемое количество в смеси с фосфогипсом для достижения рН среды ~ 7-8 составляет 7-8 % от массы твердой фазы [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов, Д.В. Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона / Д.В. Герасимов, А.А. Игнатьев, В.М. Готовцев, И.В. Голиков // Дороги и мосты. – 2018. – № 40. – С. 264–315.

УДК 628.316.12:546.146

А.С. Василевский, асп.; И.В. Войтов, проф. д-р техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЛЬЦИЙ-СИЛИКАТСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФОСФАТОВ

Повышение эвтрофирования водных объектов вместе с уменьшением запасов разведанных фосфорсодержащих ресурсов, интенсифицирует процесс исследований и разработок в области очистки сточных вод от фосфатов на очистных сооружениях канализации, с возможностью максимального возврата фосфора в производственный цикл. Наиболее перспективным способом извлечения фосфатов из сточных вод является их сорбция в процессе обработки возвратных потоков (иловой воды и фугата), образующихся в результате биологической очистки сточных вод активным илом.

В качестве сорбентов наибольший интерес представляют материалы, полученные путем высокотемпературной обработки из природных карбонатных и кремнеземистых пород, в силу своей дешевизны и доступности, содержащих в своем составе Ca, Mg, Fe, Si. Предполагается, что комбинация кремнеземистой и карбонатной породы в исходной смеси позволит получить материал с высоким содержанием Ca и Si, и при этом с высокоразвитой пористой структурой.

В данной работе исследовано получение сорбционных материалов из смеси карбонатных и кремнеземистых пород Республики Беларусь. Разработаны и исследованы составы сорбционных материалов с использованием трепела, доломита, мела в качестве исходных компонентов.

Предварительная оценка эффективности использования полученных материалов проводилась путем исследования кинетики извлечения фосфатов полученными материалами, изучена сорбционная емкость и пористость последних.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования синтезированных материалов для очистки сточных вод от фосфатов. Химический анализ отработанных материалов позволяет рассчитывать на их эффективное повторное использование в качестве фосфорсодержащего удобрения, что решает вопрос возврата фосфора в производственный цикл. Использование смеси трепела и мела, позволяет достичь более высоких результатов в эффективности удаления фосфатов.

УДК. 621.317

И.О. Оробей, доц, канд. техн. наук;

В. В. Сарока, доц., канд. техн. наук; М.А. Анкуда, ст. преп.

(БГТУ, г. Минск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДЖЕКОБСОНА-ВАНГСНЕССА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Особенности эффекта Джекобсона-Вангснесса (Д-В) перспективно использовать для измерения характеристик магнитных полей. При регистрации спектра ЯМР в изменяющемся магнитном поле скорость расстройки частоты прецессии ядер от резонансной отлична от нуля, что приводит к сдвигу частоты резонанса и искажениям кривых поглощения и дисперсии [1].

При регистрации спектра ЯМР от движущейся жидкости поле, действующее на элемент ее объема, изменяется по закону:

$$dB/dt = W \cdot \text{grad}_{11} B + 2 \cdot \pi \cdot V_m \cdot f_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t) + dB_p/dt, \quad (1)$$

где W – скорость жидкости; $\text{grad}_{11} B$ – продольный градиент; V_m , f_m – амплитуда и частота модуляции; dB_p/dt – скорость развертки поля. Это удовлетворяет условиям возникновения эффекта Д–В. При постоянном градиенте сдвиг частоты и искажения спектра для каждого типа жидкостей однозначно связаны с их скоростью и наоборот, при постоянном расходе возможно использование эффекта для получения информации о характеристиках магнитного поля.

Для измерения магнитного поля с использованием эффекта Д–В трубопровод с жидкостью помещают в магнитное поле с неизвестным продольным градиентом и записывают спектр ЯМР. Выбором V_m и f_m и условий записи спектра (dV_p/dt) можно добиться того, чтобы для любого объема dV/dt определяется первым слагаемым в (1), т.е. скоростью или градиентом [2].

Для оптимизации параметров измерителя поля на эффекте Д–В исследовались зависимости искажений спектра ЯМР от градиента поля для водопроводной воды (время релаксации $T \approx 2c$), и децимолярного раствора $NiSO_4$ в воде ($T < 0,01c$). Тракт движения жидкости - трубка с диаметром 6 мм, катушка регистрации - 10 мм. Запись спектров проводилась при условиях: $f_m = 250$ Гц; $V_m = 5 \times 10^{-6}$ Тл; $dV_p/dt = 2,5 \times 10^{-6}$ Тл/с; $W = 0-10$ см/сек, индукция в поляризаторе и анализаторе – 0,3 Тл; постоянная времени синхронного детектора – 0,3 с.

Амплитуда высокочастотного поля выбиралась уменьшением радиочастотной мощности до тех пор, пока форма сигнала останется неизменной, а величина сигнала изменяется пропорционально амплитуде высокочастотного поля, при этом эффектами насыщения можно пренебречь.

Асимметрия формы первой производной линии поглощения для каждого типа жидкостей однозначно связана с величиной градиента магнитного поля, взаимной ориентацией векторов скорости и скоростью жидкости [3].

Зависимости отношения площадей под положительной и отрицательной частями первой производной кривой поглощения от расхода описываются уравнениями:

$$S_1^{+/-} = -23 \cdot \exp(-W) + 24 ; \quad (2)$$

$$S_2^{+/-} = -14 \cdot \exp(-0.09 \cdot W) + 15 , \quad (3)$$

где $S_1^{+/-}$ и $S_2^{+/-}$ – для воды и децимолярного раствора $NiSO_4$ с продольным градиентом 0,1 Гс/см.

Формулы (2-3) доказывают перспективность метода для бесконтактного исследования градиента магнитных полей методом Д-В на малых скоростях течения жидкостей, дающих сигнал ЯМР. Использование данного метода для получения информации о поле позволит создавать новые системы контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jacobsohn A., Wangsness R. Shapes of nuclear induction signals. – Phys. Rev., 1948, v.73, p.942–946.

2. Сарока, В. В. ЯМР - расходомер жидкостей на эффекте Джекобсона-Вангснесса / В. В. Сарока, И. О. Оробей // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – 2005. – Вып. XIII. – С. 127–129.

3. Сарока, В. В. Использование эффекта Джекобсона-Вангснесса для исследования массопереноса жидкостей / В. В. Сарока, С. Е. Жарский // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы VII Республ. науч. конф. студентов и аспирантов, – Гомель, 22-24 марта 2004 г. / Гомельск. гос. ун-т. им. Скорины; – Гомель, 2004. – С. 105.

УДК 621.317

И.О. Оробей, доц, канд. техн. наук;
В. В. Сарока, доц., канд. техн. наук;
Д. С. Карпович, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ИЗМЕРИТЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ NH₃ И CO

При анализе концентрации многокомпонентных газовых смесей перспективно использование первичных преобразователей принцип действия которых основан на взаимодействии оксидов металлов с анализируемыми газами. Эти устройства перспективны для анализа количественного и качественного состава газов в различных отраслях химической промышленности. Некоторым оксидам свойственна избирательность чувствительности при различных температурах, что позволяет осуществлять комплексный анализ многокомпонентных газовых смесей. В Представленном измерителе концентрации газовых смесей использован первичный преобразователь, чувствительный резистивный элемент которого представляет собой слой оксида олова, полученный методом магнетронного распыления металлической мишени сложного состава. Чувствительный слой преобразователя через диэлектрическую подложку находится в тепловом контакте с платиновым нагревательным элементом. Для измерения концентрации NH₃ и CO электронная схема должна осуществлять изменение и стабилизацию температуры резистивного слоя оксида олова в точках максимальной чувствительности к соответствующему газу, причем из-за возникающих перекрестных помех для управления температурой нагревателя нежелательно использовать широтно-импульсную модуляцию тока нагревательного элемента. Вследствие малого теплового сопротивления между чувствительным элементом и нагревателем нагреватель может быть использован в качестве датчика температуры. Принципиальная

схема аналогового блока приведена на рисунке 1. Первичный преобразователь B_1 содержит резистивный слой допированного оксида олова R_1 и платиновый нагревательный элемент R_2 . Слой оксида олова имеет чувствительность по проводимости $\Delta\sigma/\sigma \cdot 100 = 20\%/ppm$ к NH_3 при объемной концентрации $C = 10 ppm$ и температуре $190 \pm 2^\circ C$, $\Delta\sigma/\sigma \cdot 100 = 15\%/ppm$ к CO при объемной концентрации $C = 10 ppm$ и температуре $250 \pm 2^\circ C$ и практически нечувствителен к NO_x в диапазоне температур от 0 до $300^\circ C$ [1].

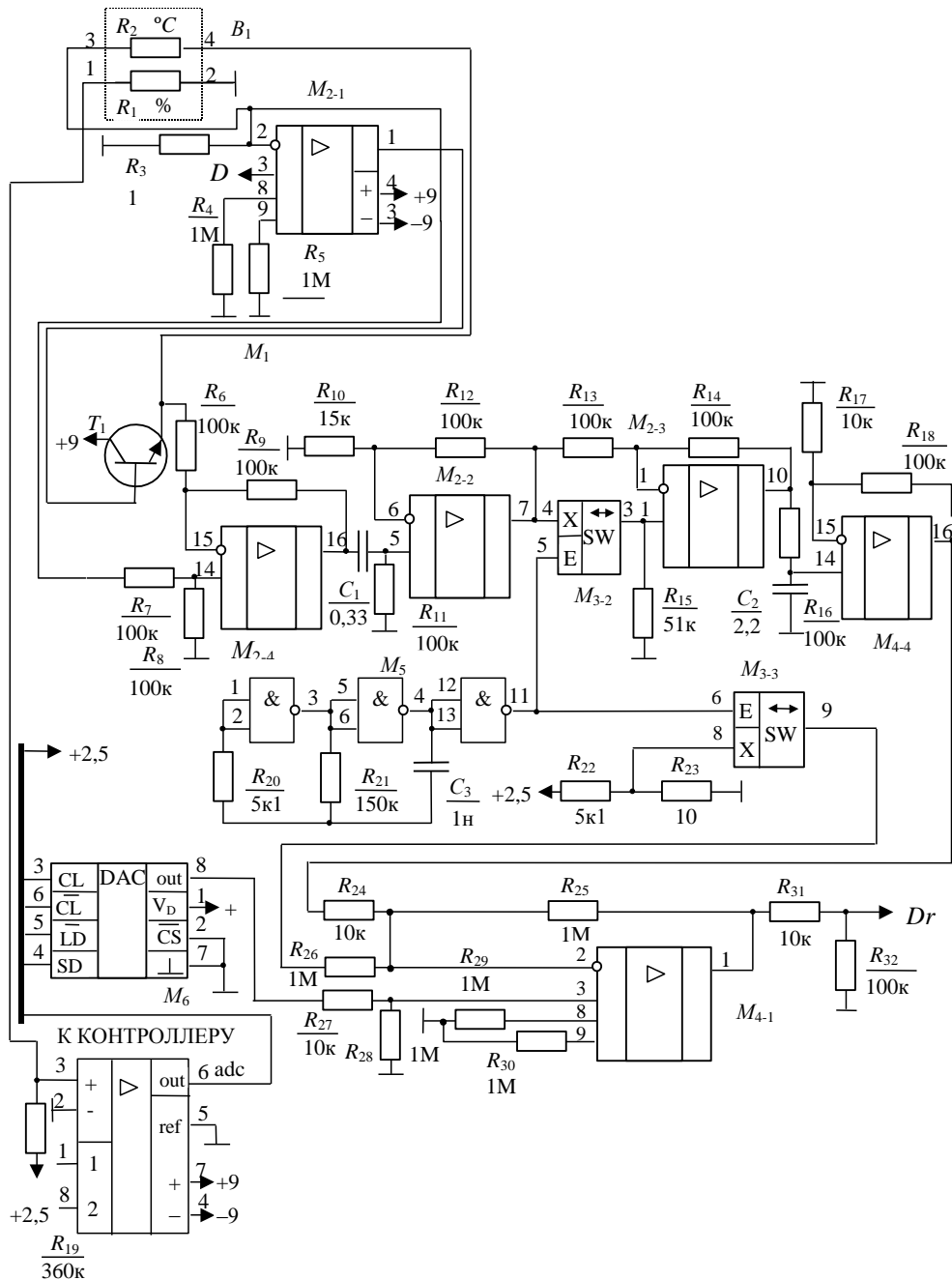


Рисунок 1 - Принципиальная схема аналогового блока измерителя концентрации

Линейное увеличение проводимости слоя оксида олова от концентрации сохраняется вплоть до $C = 1000$ ppm. Начальное сопротивление R_1 при отсутствии NH_3 и CO лежит в пределах 300 ± 50 к, сопротивление нагревателя при температуре $t = 0^\circ\text{C}$ $R_2(0) = 10$ Ом, статическая характеристика $R_2(t)$ соответствует платиновому термометру сопротивления типа Pt100. Измеритель концентрации работает следующим образом. Сигнал задания температуры для усилителя ошибки M_{4-1} формируется ЦАП M_6 под управлением контроллера, принципиальная схема которого приведена на рисунке 3.19. Выходной сигнал Dr усилителя ошибки управляет источником тока нагревателя R_2 , выполненным на M_{2-1} , T_1 . Для определения температуры нагревателя в управляющее напряжение Dr добавлен меандр с частотой 3 кГц, вырабатываемый ключом M_{3-3} под управлением генератора M_5 . Зависимость амплитуды меандра напряжения на R_2 от температуры $U_{mR_2}(t)$ в напряжение, пропорциональное температуре, осуществляется дифференциальным усилителем M_{2-4} ; активным фильтром низких частот на C_1 , R_{11} , M_{2-2} ; с.д., выполненным на M_{2-3} , M_{3-2} и усилителем на M_{4-4} [1].

Задающее напряжение, вырабатываемое ЦАП M_6 обеспечивает не менее 7 младших значащих разрядов ЦАП на 1°C в требуемом температурном диапазоне. Развертка задающего напряжения осуществляется циклически с двухсекундной выдержкой постоянных напряжений, соответствующих температурам 190 и 250°C , что определяется длительностью переходного процесса в системе источник тока, R_2 , R_1 .

Падение напряжения на R_1 , обратно пропорциональное концентрации измеряемого газа, через буферный повторитель, выполненный на измерительном усилителе M_1 , поступает на Δ - Σ АЦП, расположенный в микропроцессорном блоке.

Максимальное значение сопротивления R_1 заносится в память контроллера при калибровке устройства. Программное обеспечение контроллера учитывает паразитное перекрестное влияние компонент газов на результаты измерения, что позволяет получить погрешность не более 1 ppm по каждой компоненте в диапазоне концентраций 0–1000 ppm. Информативный сигнал с выхода $DA1$ поступает на вход контроллера. Анализ осуществляется циклически, последовательно анализируя вклад каждой из "возможных" составляющих газов.

Управление данным устройством осуществляется при помощи микропроцессорного контроллера, схема которого представлена в [1]

ЛИТЕРАТУРА

1. Orobei, I. O. A Gas-Mixture Concentration Meter / I. O. Orobei, N. J. Shishkin, V. V. Saroka // Instruments and Experimental Techniques. – 2004. – Vol. 47, No. 3. – P. 415–416.

ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ С УЧЕТОМ НАЧАЛЬНЫХ СРОКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ

Система планово-предупредительного ремонта (ППР) представляет собой комплекс организационно-технических мероприятий предупредительного характера, проводимых в плановом порядке для обеспечения работоспособности элементов систем автоматизации в течении всего предусмотренного срока службы. Возможны несколько способов (стратегии) планирования работ:

1. Помимо проведения запланированной профилактики после каждого отказа (ремонта) проводится внеплановая профилактика, после чего планируется заново время до проведения очередной профилактики.

2. Вне зависимости от того, возникали или нет отказы аппаратуры в период между профилактиками, проводится только плановая профилактика.

3. Профилактика назначается в зависимости от текущего состояния работоспособности объекта, определяемого при периодическом инструментальном контроле.

При планировании проведения диагностических и профилактических работ, для многих технических систем распределение времени безотказной работы при износе, расстройке и ряде других случаев описывается плотностью вероятности $g(t)$, для которой характерно наличие начального периода с нулевым значением.

Время, начиная с которого практически наблюдается появление отказов, назовем временем начала отказов ($\tau_{но}$). Вне зависимости от того, какому закону подчиняется распределение отказов после $\tau_{но}$, учет этого времени имеет существенное значение при проведении профилактических работ [1].

Оптимальное время проведения профилактических работ будем определять из условия оптимального значения коэффициента использования η :

$$\eta = \frac{T_p}{T_k}, \quad (1)$$

где T_p – среднее время безотказной работы; T_k – общее (календарное) время работы системы.

где P_1 – значение вероятности безотказной работы при проведении первой профилактики; n – число циклов профилактических работ.

Подставив значения вероятностей из формул (4) в (2) и просуммировав все значения S точки зрения экономики, снижения удельных затрат топлива и энергии весьма привлекательным является использование фосфогипса без его перевода путем обжига в вяжущее. Установлено, что получение изделий на основе фосфогипса возможно при использовании давления прессования в сочетании с различными способами активации фосфогипса (нейтрализация, измельчение, введение добавок и др.). Прочность получаемых изделий может достигать высоких значений при использовании способа фильтрационного прессования. Получены изделия с прочностью на сжатие до 30 МПа. Однако, способ филтпрессования связан с применением пресс-форм сложной конструкции. Повышенное содержание воды в формовочных смесях увеличивает время прессования и снижает производительность я, после несложных преобразований получим выражение для среднего времени безотказной работы

$$T_p = (1 + P_1 + P_1^2 + P_1^{n-1}) \left\{ \tau_{но} + \int_{\tau_{но}}^{\tau_p} [1 - a_1(\tau - \tau_{но}) - a_2(\tau - \tau_{но})^2 - \dots] d\tau \right\}. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$S_n = 1 + P_1 + P_1^2 + P_1^{n-1}; \quad (6)$$

$$Q_n = \tau_{но} + \int_{\tau_{но}}^{\tau_p} [1 - a_1(\tau - \tau_{но}) - a_2(\tau - \tau_{но})^2 - \dots] d\tau \quad (7)$$

Многочлен (6) представляет собой сумму геометрической прогрессии и ее можно записать в виде

$$S_n = \frac{1 - P_1^n}{1 - P_1} = \frac{1 - (1 - z)^n}{z} \approx \frac{1 - e^{-nz}}{z}; \quad (8)$$

где $z = 1 - P_1$; $n = \frac{T_k}{\tau_p + \tau_{np}}$.

В формуле (8) неизвестной является только величина z , которую можно выразить через разложение P_1 . Для увеличения точности членами разложения

$$z = a_1(\tau - \tau_{но}) + a_2(\tau - \tau_{но})^2 + a_3(\tau - \tau_{но})^3. \quad (9)$$

Сделав подстановку формулы (9) в (8), получим выражение многочлена S_n в виде

$$S_n = \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_k [a_1(\tau_p - \tau_{но}) + a_2(\tau_p - \tau_{но})^2 + a_3(\tau_p - \tau_{но})^3]}{\tau_p + \tau_{np}}\right)}{a_1(\tau_p - \tau_{но}) + a_2(\tau_p - \tau_{но})^2 + a_3(\tau_p - \tau_{но})^3} \quad (10)$$

Величина Q_n с точностью до малых величин первого порядка может быть представлена соотношением

$$Q_n \approx \tau_p \quad (11)$$

Подставляя равенства (10) и (11) в (5), получим выражение среднего времени безотказной работы

$$T_p = \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_k [a_1(\tau_p - \tau_{но}) + a_2(\tau_p - \tau_{но})^2 + a_3(\tau_p - \tau_{но})^3]}{\tau_p + \tau_{np}}\right)}{a_1(\tau_p - \tau_{но}) + a_2(\tau_p - \tau_{но})^2 + a_3(\tau_p - \tau_{но})^3} \tau_p, \quad (12)$$

а затем, введя значение T_p в формулу (1), установим равенство для коэффициента использования:

$$\eta = \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_k [a_1(\tau_p - \tau_{но}) + a_2(\tau_p - \tau_{но})^2 + a_3(\tau_p - \tau_{но})^3]}{\tau_p + \tau_{np}}\right)}{T_k [a_1(\tau_p - \tau_{но}) + a_2(\tau_p - \tau_{но})^2 + a_3(\tau_p - \tau_{но})^3]} \tau_p, \quad (13)$$

Использование полученного коэффициента позволит решать задачи на определение оптимальной продолжительности профилактики при различных условиях работы системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демидов, Н.С. Учет начального времени возникновения отказов при планировании профилактических работ / Н.С. Демидов – Надежность и эффективность дискретных систем. – Рига: Зинатне, 1968.
2. Сарока, В.В. Организация планирования профилактических работ с учетом начальных сроков возникновения отказов / В.В. Сарока, В.В. Лихавицкий, С.А. Овцов С.А. // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3-6 октября 2018 г. – М. : БГТУ, 2018. – 219 с.

АДРЕСНО-РЕГУЛИРУЕМОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В МЕЖСИСТЕМНЫХ ЛЭП

В реализации транзитного потенциала Республика Беларусь исходит из положений и принципов Европейской Энергетической Хартии, целью которой является создание общего недискриминационного рынка электроэнергии на евразийском континенте посредством организации параллельной работы крупных энергетических объединений – USTE, CENTREL, NORDEL и объединения энергосистем стран СНГ и ОЭС Балтии. Этому способствует участие Беларуси в разработке крупных международных проектов «Восток – Запад в условиях функционирования Балтийского кольца», «Параллельная работа стран СНГ с ОЭС Европы».

Объединенная энергосистема (ОЭС) Республики Беларусь граничит с энергосистемами пяти сопредельных государств (Россия, Литва, Латвия, Украина, Польша), имея с ними межгосударственные перетоки электроэнергии (ЭЭ) по 38 линиям. Потому взаимодействие энергосистем с учетом высоковольтных межсистемных транзитов (МТ) определяет надежность электроснабжения дефицитных регионов и приобретает не только режимный, но и экономический смысл.

Поскольку современные питающие и межсистемные линии электропередачи (МЛЭП) представляют собой многоконтурную и сложнозамкнутую сетевую структуру, выбор рациональных режимов эксплуатации энергосистем с учетом МТ представляет довольно трудную задачу, которая имеет ряд принципиальных особенностей, вызывающих определенные сложности. Ведение оптимального режима в ЭЭС подразумевает решение комплекса задач, обеспечивающих минимальные издержки. В число этих задач входят такие, как выбор состава работающего оборудования, распределение нагрузок между станциями с минимизацией расхода топлива и с наименьшими потерями в электрических сетях, а также рациональная работа всего объединения с учетом межсистемных линий электропередачи. Формулировку данной проблемы можно описать с помощью многокритериальной целевой функции, которая включает в себя минимум отклонения значений перетоков от запланированных значений, минимум суммарного расхода топлива, минимум потерь мощности и энергии, как в энергосистеме, так и в межсистемных линиях электропередачи.

Основные показатели, необходимые для принятия оптимальных решений, были разработаны автором ранее на основе системного ана-

лиза с охватом всех определяющих факторов, т. е. были созданы документы для их оперативного использования диспетчерским персоналом смежных энергосистем. В нашем случае речь идет о многолетнем оперативно-диспетчерском взаимодействии Системного Оператора Единой энергетической системы РФ (СО ЕЭС) и Объединенного диспетчерского управления Республики Беларусь.

Важным элементом такого управления является адресно-регулируемое распределение мощностей для межсистемных перетоков в энергообъединении (ЭО), т.е. оптимизация текущего режима за отрезок времени, в течение усредненного часового (получасового) интервала, когда параметры сети можно считать условно постоянными. При таком допущении каждый интервал рассматривается как независимый, а осуществление баланса между производством и потреблением ЭЭ необходимого качества считается гарантированным. В этом случае задача управления ЭО в течение определенного интервала (например, суток) распадается на ряд последовательных задач, результаты решения которых в агрегированном виде дают искомый суточный график для ведения режима всего ЭО. Если при этом были выполнены ограничивающие условия по изменяющимся параметрам и, достигнут минимум затратных средств, то режим ЭО будет оптимальным. Для разных часовых интервалов (особенно во время сезона пиковых нагрузок) выполняется перераспределение энергоперетоков с соседними энергосистемами. Экономически целесообразные величины покупаемой и продаваемой ЭЭ определяются на основе технико-экономических и режимных расчетов с учетом технических, режимных, директивных и ценовых ограничений. Для расчетного уровня транзитной мощности определяется оптимальная загрузка электростанций энергосистемы для различных часовых интервалов. Получаемое при этом рациональное значение мощности для разных нагрузок энергосистемы позволяет определить оптимальное количество экспортируемой электроэнергии на планируемый расчетный период в соответствии с договорными условиями. Исходными данными для анализа режимов являются расчетные балансы мощности по энергосистемам, принимаемые на основе прогнозов электропотребления и электрических нагрузок на рассматриваемый перспективный период. Эти балансы разрабатываются для основного планируемого режима, а также для заданных режимов, которые могут иметь место при неблагоприятных сочетаниях, в частности, плановых ремонтов энергетического оборудования, а также аварийных режимов, включая потерю устойчивости и отказ элементов системной автоматики. Однако, учитывая множество целей у субъектов и противоречивость их интересов, взаимодействие межгосударственных перетоков влечет за собой нивелирование нормативов в рамках общесистемной

надежности во всем Таможенном пространстве (Беларусь-Россия-Казахстан), что на сегодняшний день юридически пока не определено и требует, по-видимому, создания системы механизмов координации на международном уровне. На первом этапе решения задачи коррекции режима ЭЭС можно ограничиться возможностью регулирования потоков ЛЭП с помощью средств генерации активной и реактивной мощности (электростанции системы и источники реактивной мощности). В этом случае критерием оптимальности считаются минимальные изменения узловых мощностей (по сравнению с исходным режимом), затем подключаются узлы с источниками регулирования активной и реактивной мощности, соответствующие ветвям, имеющим трансформаторы с РПН.

УДК 681.5

В. И. Бакаленко, доц., канд. техн. наук;
О. Г. Барашко, доц., канд. техн. наук; Т. А. Дейнека, ассист.
(БГТУ, г. Минск)

НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ

Температура теплоносителя в подающем (t_1) и обратном (t_2) трубопроводах теплосети изменяется зависимости от температуры наружного воздуха ($t_{нв}$) в соответствии с графиком центрального качественного регулирования (ЦКР). При этом предполагается, что при температуре окружающей среды, равной плюс 18°C , теплоотдача должна быть равной нулю, т. е. температура воды в трубопроводах теплосети тоже должна быть равна 18°C .

В реальных условиях такого уменьшения температуры не происходит, т. к. для нагрева горячей воды до требуемых 50°C , температура в подающем трубопроводе не должна опускаться ниже $60\text{--}70$ градусов. В результате этого при температурах выше плюс 2°C батареи системы отопления имеют более высокую температуру, и имеет место так называемый перетоп. Поэтому сегодня практически каждый дом оснащен системой автоматического регулирования, дополняющей ЦКР местным количественным регулированием, цель которого обеспечить зависящую от температуры наружного воздуха подачу тепла во всем диапазоне изменений температуры наружного воздуха. Это достигается изменением количества теплоносителя, отбираемого из тепловой сети.

Упрощенная схема такой системы регулирования приведена на рисунок 1, где изменение температуры теплоносителя в системе отопления (t_{11}) осуществляется изменением количества теплоносителя G , отбираемого из тепловой сети. Сегодня потребителю предлагается большое количество специализированных микропроцессорных

устройств, позволяющих организовать регулирование с достаточно высоким качеством.

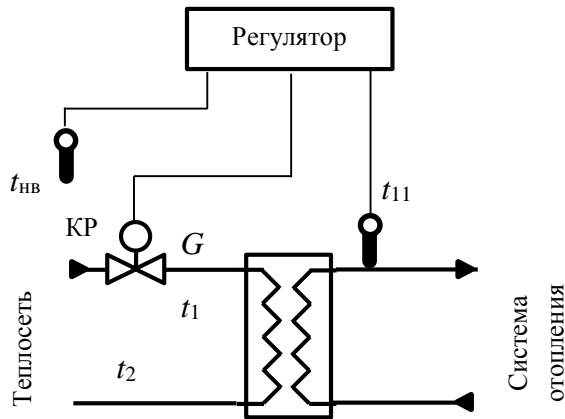


Рисунок 1 – Схема регулирования теплотребления

Наиболее часто встречающимися ошибками, не позволяющими полностью использовать предоставляемые возможности, являются неправильный выбор исполнительного механизма (ИМ) и установленные настройки регулятора.

В первом случае, чаще завышается значение K_y регулирующего органа (РО), в результате чего РО работает на начальном участке своей характеристики,

обеспечивая близкий к релейному закон регулирования.

Во втором случае в процессе эксплуатации имеет место изменение характеристик объекта, и установленные ПИД-коэффициенты не являются оптимальными во всем диапазоне этих изменений.

Обычно, в эксплуатационной документации приводится приближенный алгоритм настройки ПИД-коэффициентов, основанный на экспериментально определяемых коэффициенте передачи и постоянной времени объекта. Эта процедура проводится в начале отопительного сезона, когда температура наружного воздуха около плюс 8 °С.

В течение отопительного сезона температура может опускаться до минус 25 °С, что приводит к изменению статической характеристики объекта регулирования.

Системы отопления здания можно рассматривать как апериодическое звено с запаздыванием [1]. Постоянная времени может составлять несколько часов, причем процесс нагрева и охлаждения происходит с разной скоростью. Коэффициент передачи K_o увеличивается с ростом температуры теплоносителя. Постоянная времени самого здания колеблется от десятков до сотен часов.

При регулировании отопления, учитывая малую амплитуду и медленный характер возмущений, регулятор, настроенный в начале отопительного сезона с определенным запасом устойчивости, обеспечивает удовлетворительный результат в течение всего отопительного сезона. Кроме того, предлагаемые на рынке адаптивные регуляторы позволяют производить периодическую автоподстройку.

Системы горячего водоснабжения (ГВС) характеризуются малой инерционностью, значительными и резкими возмущениями. В таких системах установка РО с K_y , превышающим расчетное значение, оказывает

гораздо большее влияние на качество регулирования, чем в системах отопления. Наиболее приемлемой характеристикой РО для систем ГВС является логарифмическая или близкая ей билинейная (составная) [2], в то время как на объектах преимущественно используются РО с линейной характеристикой. Кроме того, как показывают результаты экспериментов, у таких РО в начальной части расходной характеристики имеется отклонение от линейности в большую сторону.

Как и в системах отопления, изменение температуры теплоносителя в сети приводит в системах ГВС к изменению K_o объекта по каналу управления в несколько раз. И, если, эти изменения происходят очень медленно, то изменения K_o вследствие водоразбора происходят значительно быстрее (десятки секунд), причем в течение суток такие изменения могут происходить несколько раз. В результате, приходится искать компромисс, приводящий к тому, что установленные настройки ПИД-коэффициентов обеспечивают удовлетворительное качество регулирования в течение короткого времени работы.

Использование режима автоподстройки ПИД-коэффициентов также не всегда оправдано, так как в таких условиях не каждый алгоритм адаптации способен справиться с поставленной задачей.

Еще одна ошибка при настройке системы регулирования связана с тем, что в качестве ИМ в системах регулирования ГВС рекомендуется выбирать быстродействующие электроприводы с временем хода штока от 15 до 40 с. При этом не дается рекомендаций по выбору зоны нечувствительности регулятора ($\delta_{неч}$) и минимального времени воздействия на ИМ ($\tau_{мин}$). Часто, для увеличения ресурса работы переключающих реле регулятора, минимальное время воздействия устанавливают около 1 сек. Тогда у быстродействующего ИМ изменение положения РО может вызвать изменение температуры, превышающее зону нечувствительности, что приведет к колебательному переходному процессу.

Чтобы избежать этого, необходимо, как минимум, обеспечить неравенство $k_{об} \cdot \tau_{мин} < \delta_{неч}$

Обеспечить требуемое качество регулирования в системах ГВС в течение всего отопительного сезона можно, создавая более сложные, чем одноконтурные, системы, использующие дополнительную информацию о характеристиках объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.Б. Харитонов. – СПб: АВОК Северо-Запад, 2008. – 304 с.
2. Регулирующие клапаны и исполнительные механизмы / Каталог. – ООО Данфосс, Москва, 2020. – 354 с.

УДК 681.527

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук; И. Г. Сухорукова, ст. преп.;
В. Л. Алексеев, магистр.; Шилин А. М., студ. (БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЛЫЖИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПНЕВМОЦИЛИНДРА

При разработке и производстве сложных композиционных изделий встает вопрос о механических испытаниях, которые являются неотъемлемой частью разработки технологии производства многих деталей в различных отраслях промышленности. Необходимость тестирования в одних случаях обусловлена требованиями законодательства и сертификации, в других – элементами разработки и оптимизации. Испытания могут проводиться на универсальных стендах, которые широко выпускаются для научных и промышленных лабораторий производителями тензометрического оборудования. Однако универсальность промышленных стендов редко обеспечивает нужную чувствительность, которая необходима для оптимизации и полного соответствия нормативным документам. Проверка механических характеристик лыж выполняется согласно ГОСТ 30045-93, ISO 7138:2017, ISO 7798:2017 и других подходов [1].

Одним из тестов для проверки композиционных спортивных лыж является испытание на циклические нагрузки. Первоначальным способом создания циклических нагрузок было применение двигателя с использованием механической передачи с эксцентриком. Данный вариант характеризуется определенными сложностями механики.

В качестве альтернативы был выбран подход, который предполагает использование пневмоцилиндра с переключением посредством управляемого золотника. Данный вариант характеризуется более низкой стоимостью оборудования, отсутствием тангенциального взаимодействия между оборудованием и исследуемым объектом. Динамическое взаимодействие между пневмоцилиндром и упругой исследуемой структурой представляет собой сложный процесс. Это обусловлено не только анизотропией сил сопротивления композиционной конструкции в зависимости от направления воздействия, но и нелинейностью самой силы сопротивления лыжи. Своей динамикой обладает и сам пневмоцилиндр. При работе на частотах 1-3 Гц перераспределение воздушных потоков не проходят мгновенно, что приводит к нелинейному характеру воздействия силы на лыжу.

С целью оптимизации работы испытательного стенда, а также возможности получения дополнительной информации при проведении конструкторских разработок, была проведена серия испытаний с контролем геометрических перемещений одной из точек конструкции при

периодическом воздействии.

Технические средства, которые были предусмотрены в комплекте испытательного стенда, не позволили получить требуемую динамику фиксации результатов измерения геометрических параметров. По этой причине было решено проводить прямое измерение выхода датчика с помощью цифрового осциллографа. При сложной динамике изменения геометрии движения данный подход показал высокую зашумленность (рис. 1). По этой причине появилась необходимость выполнения сглаживания, которое основывалось на подходе, разработанном в [2-3]. Подход предполагает использование покадровой аппроксимации методом наименьших квадратов и спектральный анализ (рисунок 2).

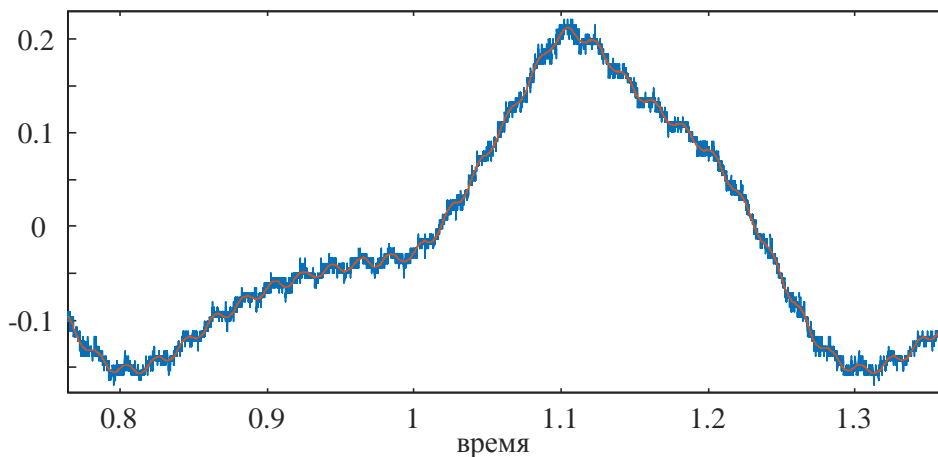
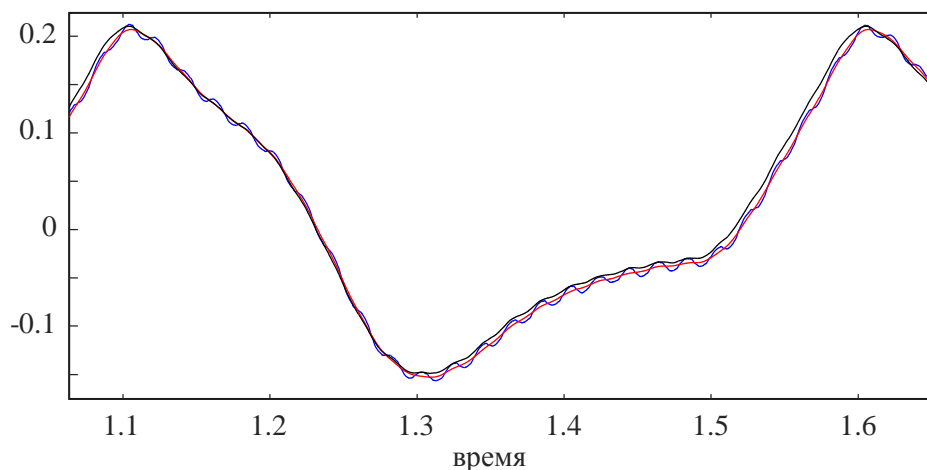


Рисунок 1 – Один такт исходного сигнала



**Рисунок 2 – Результаты сглаживания
исходных трендов сигнала**

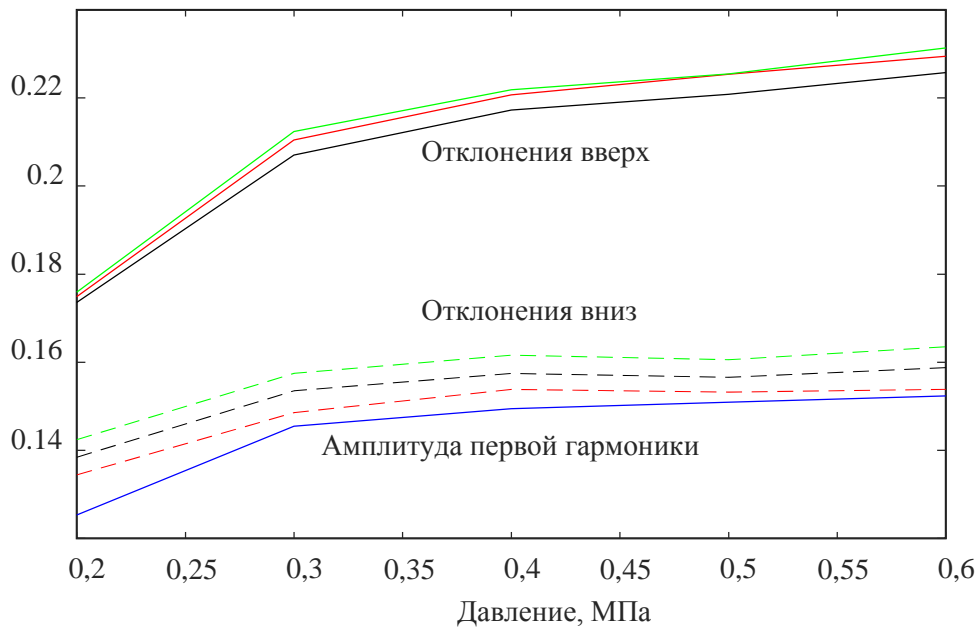


Рисунок 3 – Зависимость максимального отклонения давления в пневмоцилиндре вверх и вниз при разных вариантах сглаживания

Несмотря на то, что частоту переключения задает контроллер, наблюдаются небольшие флуктуации частоты, что затрудняет обработку результатов. В воздушном тракте присутствует саморегулятор давления, который формирует давление питания для пневмоцилиндра. Одной из первостепенных задач выступала задача оптимизации потребления воздуха. Зависимости отклонения от давления (рис. 3) показывают, что рациональным давлением питания будет давление в 0,35-0,4 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Faturdo Orellana, R. Experimental Methods to Measure Mechanical Properties of Cross Country Skis: Load-displacement and Contact Surface.
2. Гринюк, Д. А. Использование алгоритмов аппроксимации для сглаживания трендов измерительных преобразователей / Д. А. Гринюк, И. Г. Сухорукова, Н. М. Олиферович // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. – Минск : БГТУ, 2017. – № 2 (200). – С. 82-87
3. D. Hryniuk, I. Suhorukova and N. Oliferovich. Adaptive smoothing and filtering in transducers // 2016 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, Lithuania, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/eStream39242.2016.7485917.

УДК 681.527

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук; Н. М. Олиферович, ассист.;
А. В. Фоменко, инж.; Р. С. Жук, студ. (БГТУ, г. Минск)

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИВА

Производство пива, в общем случае, состоит из нескольких этапов, таких как сололожение; приготовление сусла; брожение; фильтрация и пастеризация и т.д. Как объект автоматизации они представляют собой непрерывно-дискретный процесс. По этой причине часто динамика основных каналов управления является величиной непостоянной.

Такими особенностями характеризуется этап процесса смешения пива со специально подготовленной водой (ДАВ). Смешение ДАВ и высокоплотного пива происходит непосредственно в трубопроводе. Высокоплотное пиво подаётся из буферного танка при помощи центробежного насоса, а подача ДАВ регулируется пневматическим клапаном. По мере освобождения танка уровень уменьшается, что влияет на давление в линии всасывания центробежного насоса. Обратный эффект происходит и на линии нагнетания. По мере выполнения процесса смешения происходит заполнения принимающего танка, как следствие, происходит увеличение уровня и возникает противодействие в линии нагнетания.

Следствием этих процессов является непостоянство расхода высокоплотного пива, который изменяется по мере заполнения буферного танка. При этом ДАВ подаётся в зависимости от расхода высокоплотного пива, в жестком соотношении. Непостоянство расхода пива и возникающее противодействие способствуют также изменению авторитета клапана, регулирующего подачу ДАВ на смешение.

Регулирование происходит на основе данных с расходомера высокоплотного пива, расходомера ДАВ и датчика плотности готового пива. Сигналом задания является соотношение расходов между высокоплотным пивом и ДАВ.

Для качественного поддержания требуемого соотношения расхода, а, следовательно, и плотности пива, необходима качественная настройка контура регулирования. Ввиду непостоянства динамики контура регулирования и высоких требований по конечной плотности невозможно построить систему управления с постоянными настройками регулятора для поддержания соотношения расходов. В случае поиска настроек регулятора, ориентированных на большие расходы, наблюдается неустойчивая работа контура в некоторых диапазонах

расхода. При поиске настроек по параметрам динамики малых расходов, наблюдается сильно затянутый переходной процесс.

В общем случае, возможен вариант построения адаптивной системы подстройки коэффициентов регулятора. Однако в таком случае, с одной стороны, имеет место практически детерминированный характер изменения динамики в контуре стабилизации, с другой стороны, для непрерывных адаптивных систем регулирования всегда характерна временная задержка по актуальной динамике. С учетом вышесказанного, оптимальным решением данной проблемы будет использование адаптивного табличного управления [1]. Для этого потребуется весь диапазон изменения динамических характеристик объекта управления разбить на отдельные участки, найти для каждого участка актуальные настройки регулятора и выбрать параметр перехода с одних настроек на другие. В качестве такого параметра могут выступать показания датчика уровня в танке и датчиков давления и расхода в трубопроводе. Один из возможных вариантов структурной схемы управления приведен на рис. 1, где W_A – передаточная функция исполнительного механизма, который формирует расход F_A ; W_{O1} – передаточная функция контура стабилизации расхода F_D ДАВ; W_{O2} – передаточная функция связывающая расход F_D и плотность пива ρ ; γ – коэффициент результата линеаризации отношения расходов ДАВ F_D и пива F_B .

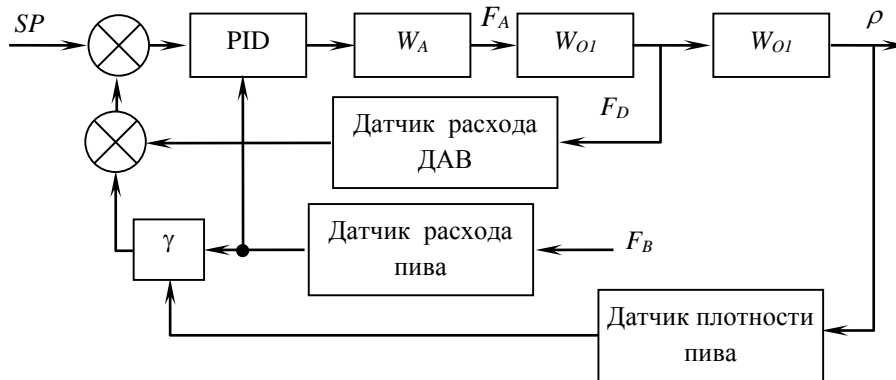


Рисунок 1 – Структурная схема системы стабилизации расхода ДАВ

Динамика исполнительного механизма W_A достаточно хорошо описывается аperiodическим звеном первого порядка с постоянным значением постоянной времени, однако из-за изменения авторитета клапана коэффициент k_A у него переменный. Передаточная функция W_{O1} – представляет собой аperiodическое звено (T_{O1}) с запаздыванием τ_{O1} , которое зависит от значений расхода. Расход пива в процессе смешивания изменяется от 10 до 50 м³/ч. Первоначально данный диапазон был разбит на три диапазона. Для каждого из них были найдены

настройки регулятора, однако в точках перехода между диапазонами наблюдалось достаточно низкое качество переходных процессов. Количество диапазонов было увеличено до 4. Результат моделирования можно видеть на рисунке 2. Настройки регулятора находились путем минимизации интегральных критериев [1-2].

Таблица 1 – Динамические параметры модели

Расход, м ³ /ч	10-20	20-30	30-40	40-50
k_A	1,52	1,07	0,73	0,56
T_{OI}	5,25	3,21	2,32	1,82
τ_{OI}	8,43	5,06	3,61	2,81

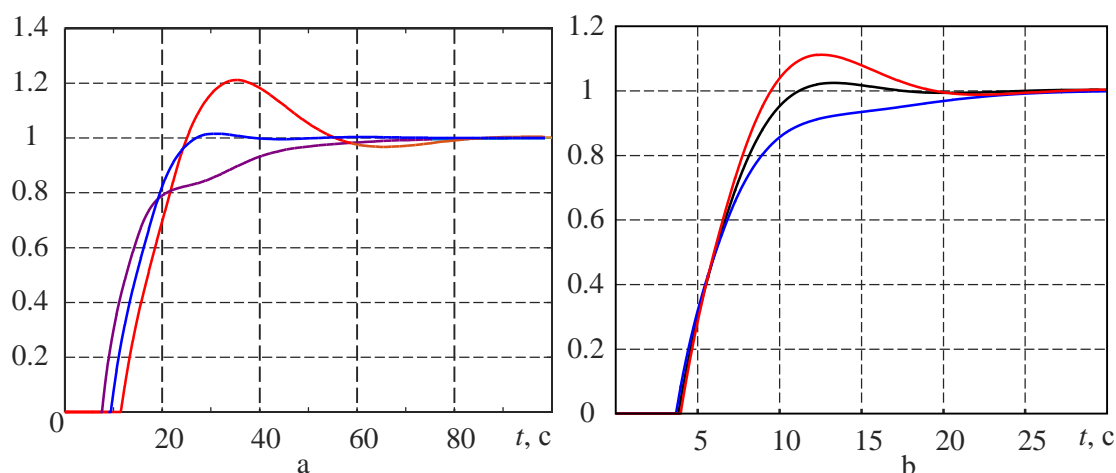


Рисунок 2 – Результат моделирование при параметрах настройки ПИД регулятора, найденных для среднего значения k_A , T_{OI} , τ_{OI} диапазонов 10-20 (а) и 40-50 (б) м³/ч и при значениях на границе диапазонов адаптации

Выбранный метод решения прикладной задачи показывает хорошие результаты и может быть рекомендован для внедрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Hryniuk, I. Suhorukova, N. Oliferovich and I. Orobei, Complex tuning of the PID controller according to integral criteria, *2018 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*, Vilnius, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/eStream.2018.8394117.

2. Анализ эффективности ПИД-регуляторов с двумя степенями свободы с помощью интегральных критериев / Д. А. Гринюк [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. - Минск : БГТУ, 2018. – № 2 (212). – С. 82–88.

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;
И. Г. Сухорукова, ст. преп.; И. О. Оробей, доц., канд. техн. наук;
Е. В. Астапчик, студ. (БГТУ, г. Минск)

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ С НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКОЙ

Большинство объектов управления технологическими процессами являются нелинейными. При этом в теории управления наиболее детально рассмотрены задачи регулирования линейных объектов. По этой причине можно наблюдать стандартный подход к синтезу автоматических систем, который основан на определении эквивалентных динамических параметров объекта управления путем применения различных подходов линеаризации. Для большинства объектов это хорошо работает, поскольку их динамические параметры управления меняются незначительно. Но встречаются варианты объектов с несимметричной динамикой, которая оказывает существенное влияние на качество регулирования. К ним можно отнести тепловые объекты в случае разной скорости нагревания и охлаждения, можно наблюдать такой эффект и в системах стабилизации уровня с помощью центробежного насоса при больших колебаниях уровня. Такие же особенности могут происходить и при стабилизации скорости при движении в вертикальном направлении при управлении летательными аппаратами.

Настройка обычно происходит с позиции обеспечения робастности системы стабилизации. Это приводит к тому, что переходный процесс по выходному параметру в одну сторону происходит быстрее чем в другую. В принципе, при значительных возмущениях или изменении сигнала задания, возможно существенное ухудшение качества регулирования. Для исключения данного эффекта существуют различные подходы. Наиболее простым решением в задачах стабилизации является изменение настроек регулятора в зависимости от значения выходной переменной или направления ее изменения. Для большинства задач можно ограничиться наличием двух наборов настроек. При широком диапазоне изменения параметров задания потребуется использовать, например, табличное управление с различным набором настроек регулятора в зависимости от диапазона. В принципе, возможен вариант с некоторой непрерывной функцией зависимости параметров настроек регулятора от выходной переменной. Правда следует отметить, что вышеуказанные подходы приемлемы для детерминированных объектов управления с небольшой вариацией параметров.

В качестве примера возьмем аperiodический объект второго порядка с переменными постоянными времени, которые изменяются в диапазоне стабилизации: одна в пределах от 30 до 50, а вторая от 80 до 160. Постоянные времени линейно зависят от выходной переменной. Коэффициент усиления принят постоянный.

Структура управления и результат моделирования представлен на рисунке 1–2.

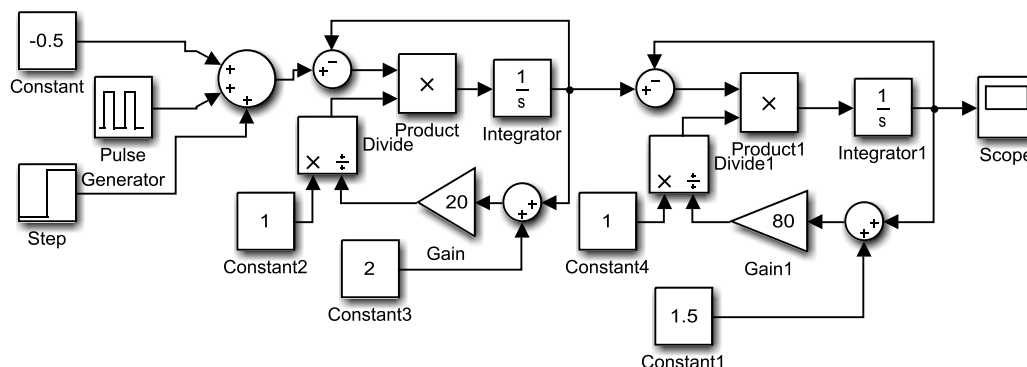


Рисунок 1 – Структура моделирования системы с переменными параметрами

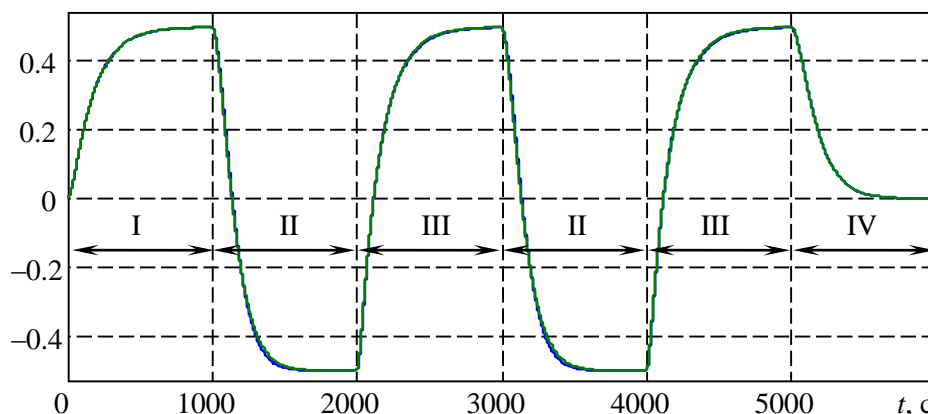


Рисунок 2 – Результат моделирования и идентификации объекта с переменными постоянными времени

По полученным временным характеристикам была проведена идентификация постоянных времени методом наименьших квадратов. Вариации параметров передаточной функции оказались достаточно существенными. Отличия наблюдаются как при изменении амплитуды сигнала на входе, так и при изменении направления воздействия. Второй фактор оказывает более существенное влияние на динамику объекта управления. При изменении сигнала на входе в направлении уве-

личения постоянных времени, значения T_1 и T_2 эквивалентных передаточных функции имеют соотношения близкие к заданным (табл. 1). При обратном направлении моделирования переходной характеристики наблюдается сближение значений T_1 и T_2 , а иногда и их полное совпадение. Подобные эффекты наблюдались и в [1]. Для второго варианта наблюдается и увеличение интегрального значения среднеквадратичного отклонения (СКО) в сравнении с первым направлением. Уменьшение значения возможно только путем повышения порядка передаточной функции аппроксимации.

Таблица 1 – Результаты идентификации

Постоянные времени	Номер участка идентификации			
	I	II	III	IV
T_1	153,5	80,69	143,6	120,2
T_2	31,02	80,69	14,98	64,40

Для повышения качества управления объектами с подобными свойствами, рационально использовать ПИД-регуляторы с коэффициентами, изменяющимися не только в зависимости от сигнала задания, например, при реализации табличного управления, но и в зависимости от градиента управляющего воздействия на объект или направления изменения управляющего воздействия. Настройку таких систем можно легко производить с помощью интегральных критериев, как это было [2–4].

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Marozava, D. Hryniuk. Experimental study of the variation dynamic's for air heat exchanger / Mokslas–Lietuvos ateitis/Science–Future of Lithuania 2017. V. 9, N^o. 3, p. 297–301
2. Сухорукова, И. Г. Применение в ПИД-законе регулирования нелинейных функций преобразования ошибки / И. Г. Сухорукова, Д. А. Гринюк, И. О. Оробей // Труды БГТУ. – Минск : БГТУ, 2013. – № 6 (162). – С. 95–98.
3. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting // 2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 2017, pp. 1–4.
4. Hryniuk D. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria. / D. Hryniuk, [at al.] 2018 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 2018, pp. 1–4.

УДК 681.527

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук; Н. М. Олиферович, ассист.;
И. Г. Сухорукова, ст. преп.; А.С. Михновец, студ. (БГТУ, г. Минск)

ВАРИАНТЫ НАХОЖДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ЧЕРЕЗ ЦИФРОВОЙ

Одним из методов синтеза ПИД-регулятора может выступать цифровой deadbeat регулятор [1-4]. Суть метода состоит в следующем. Для начала надо определить передаточную функцию канала управления каким-либо из способов, например, через составление уравнения энергетических или материальных балансов в приращениях, или путем использования дифференциальных уравнений математической физики, или, наконец, экспериментальной идентификацией. Затем, по передаточной функции объекта, определить ее вариант в z – области, используя преобразования Лорана. В Matlab для этого можно воспользоваться готовыми функциями. Затем используя работы [3-4] получить функцию апериодического регулятора исходя из требуемого качества настройки

$$W_{DB} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_m z^{-m}}{1 - p_1 z^{-1} - p_2 z^{-2} - \dots - p_m z^{-m}}, \quad (1)$$

где z – переменная z -преобразования, $z = \exp(T_0 s)$; T_0 – время квантования; m – порядок полинома.

После необходимо выполнить аппроксимацию переходной характеристики регулятора, передаточной функцией ПИД-регулятора

$$G_R(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{q_{R0} + q_{R1} z^{-1} + q_{R2} z^{-2}}{1 - z^{-1}}, \quad (2)$$

где $u(z)$ – сигнал управления на выходе регулятора; $e(z)$ – сигнал ошибки на входе регулятора.

Наибольшую трудность здесь вызывает получение значения интегральной составляющей регулятора. Переходная характеристика deadbeat регулятора при некотором количестве тактов асимптотически стремится к постоянному градиенту (рис. 1).

Как это отмечалось в [1], и как это было использовано в [2], можно взять два соседних значения управления и вычислить время интегрирования:

$$I = \frac{u(k+1) - u(k)}{T_0}, \quad (3)$$

где k – дискретные отсчеты ($k = t / T_0 = 0, 1, 2, \dots$; t – время).

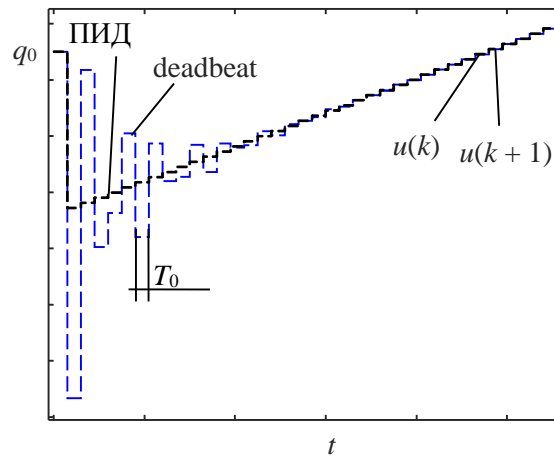


Рисунок 1 – Переходная характеристика deadbeat и ПИД

Особенно это требует больших временных затрат для объектов высоких порядков [4]. Для современного компьютера это не представляет труда, тогда как при реализации на контроллерах могут возникнуть трудности.

После определения времени интегрирования регулятора, расчет остальных параметров настройки не создает сложностей. Коэффициент усиления рассчитывается из простейшего алгебраического уравнения:

$$K = u(k) - IkT_0. \quad (4)$$

Для определения времени дифференцирования следует понять, про какую форму регулятора идет речь. Если проблема реализации дифференцирования игнорируется, то расчет может быть произведен по формуле:

$$D = q_0 - K. \quad (5)$$

В случае необходимости получения формы реального регулятора, которая часто используется на практике:

$$W_R(s) = K + \frac{1}{Is} + \frac{Ds}{Fs + 1}, \quad (6)$$

то расчетная формула приобретет иметь вид:

$$D = \frac{q_0 - K}{F}, \quad (7)$$

Следует отметить, что это не единственный вариант решения проблемы пересчета. Могут быть и другие подходы. При использовании Matlab, можно воспользоваться обратным переходом из z-области в область преобразований Лапласа. При формировании передаточной

формулы (1) в классическом виде легко получить коэффициент усиления регулятора, а затем можно воспользоваться уже найденным значением для определения интегральной составляющей регулятора, или наоборот произвести расчет непосредственно интегральной составляющей регулятора.

После преобразования из z -области в область преобразований Лапласа функции (1) результат будет представлять собой

Выражение вида

$$W(s) = \frac{c_1 s^m + c_2 s^{m-1} + \dots + c_m}{s(d_1 s^{m-1} + d_2 s^{m-2} + \dots + d_{m-1})}. \quad (8)$$

Разложение данной дроби на две составляющие

$$W(s) = \frac{A}{s} + \frac{B_1 s^{m-1} + B_2 s^{m-2} + \dots + B_{m-1}}{d_1 s^{m-1} + d_2 s^{m-2} + \dots + d_{m-1}}. \quad (9)$$

позволит определить интегральную составляющую алгебраическим способом не прибегая к прогнозированию момента превращения переходной характеристики W_{DB} в монотонно нарастающий процесс

ЛИТЕРАТУРА

1. Isermann R. Digital Control Systems. 2nd edn. Springer, Berlin, 1989. 565 p.
2. Deadbeat регулятор с прогнозируемым уровнем сигнала управления / Н. М. Олиферович [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. - Минск : БГТУ, 2018. - № 2 (212). - С. 89-95.
3. Гринюк, Д. А. Метод настройки ПИД-регулятора через deadbeat-регулятор на различные интегральные критерии / Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. - Минск : БГТУ, 2019. - № 2 (224). - С. 66-73.
4. Гринюк, Д. А. Общее решение для синтеза deadbeat-регулятора на произвольное количество шагов / Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. - Минск : БГТУ, 2020. - № 2 (236). - С. 69-75.

ОРГАНИЗАЦИЯ СУШКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Разработка и внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами являются основной тенденцией развития современного промышленного производства.

Рассмотренная линия MultiEtch PAR является частью комплексного процесса по производству печатных плат. На данном участке производится травление заготовок печатных плат химическим раствором 50% серной кислоты. В общем случае процесс травления представляет собой последовательную цепочку следующих действий:

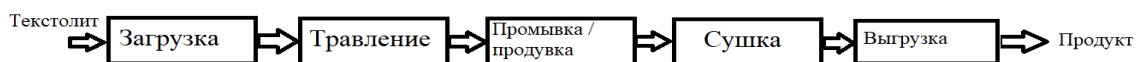


Рисунок 1 – Общая схема процесса травления

Анализ существующей системы управления показал, что основным недостатком является низкая энергоэффективность процесса, что, в свою очередь, обусловлено отсутствием частотных преобразователей для управления вентиляторами и насосами. Так же в процесс характеризуется наличием ложных остановов линии, что увеличивает затраты времени и ресурсов на повторный запуск, а, следовательно, снижает производительность. Система управления не позволяет обеспечить постоянное качество продукции, что приводит к дополнительным расходам.

Энергетические факторы технологического процесса в первую очередь определяются процессом сушки. Для анализа возможностей системы управления для целей построения рационального управления процессом потребовалось провести анализ статических и динамических характеристик. Особенность процесса конвективной сушки печатных плат является использование тепловыделений двигателя вентиляции для процесса влагоотделения.

При составлении математической модели конвективной сушки были приняты допущения: 1. Электродвигатель имеет бесконечно большую теплопроводность и, как следствие, одинаковую температуру по всему объему; 2. Количество теплоты, которым электродвигатель обменивается с окружающей средой, пропорционально раз-

ности температур двигателя и окружающей среды; 3. Тепловые параметры электродвигателя и окружающей среды постоянны и не связаны с температурой двигателя (это обстоятельство обеспечивает линейность тепловой модели); 4. Потери составляют 20%.

После длительных преобразований итоговая передаточная функция по основному каналу стабилизации температура в зоне сушки – частота оборотов имеет вид

$$W(s) = \frac{2,13(0,0456s + 1)}{5495,9s^2 + 321,81s + 1}.$$

Основной причиной отклонения температуры сушки является нестабильность свежего воздуха (рис. 2). Поэтому для повышения качества функционирования рационально использовать комбинированную систему.

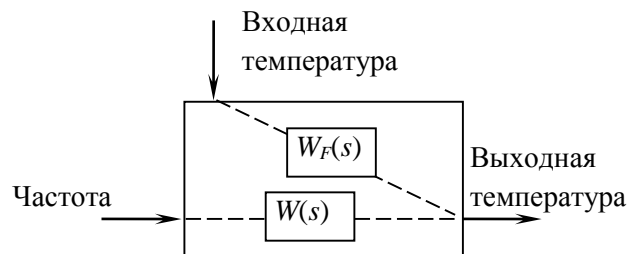


Рисунок 2 – Структурная схема управления процессом сушки

Расчет компенсатора привел к следующему виду

$$W_k = \frac{0,02936(5707s^2 + 334,1s + 1)}{0,7296s^2 + 16,05s + 1}$$

Данная передаточная функция практически не пригодна для использования в прикладных решениях. Вторые производные вместе с всегда присутствующими шумами в измерительном тракте будут приводить к большим отклонениям выходного параметра. Поэтому была произведена процедура понижения параметров.

Исходя из вида компенсатора были проверены три варианта компенсатора с низкими порядками. Компенсатор в виде форсирующего звена

$$W_k = \frac{k_1(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)}$$

с подачей сигнала на сумматор после регулятора локального контура стабилизации продемонстрировал лучшее качество переходного процесса (рисунок 3).

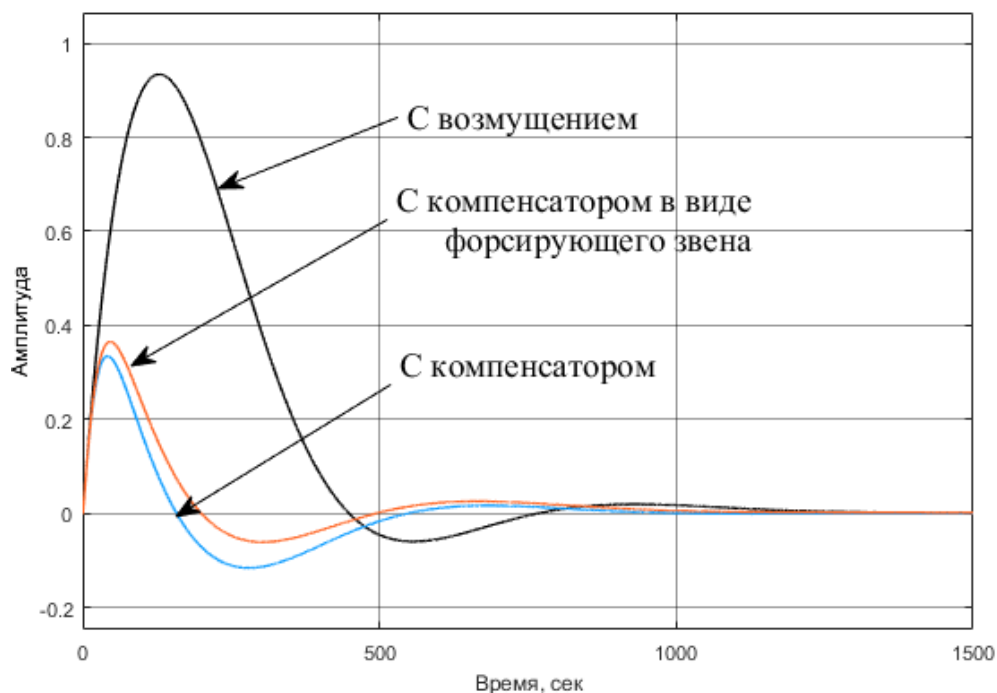


Рисунок 3 – Сравнение переходных процессов

Настройка параметров компенсатора производилась путем минимизации интегральных критериев [2]. Результат настройки показал, что коэффициент T_2 выполняет роль выполнения дифференцирования. Его выбор будет больше определяться выбором шага квантования программируемого логического контроллера.

Построение инвариантной системы позволяет минимальными капиталовложениями решить задачу эффективного управления процессом сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метельков В.П. О расчете параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя// Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2016, vol. 16, no. 1, pp. 58–65
2. Гринюк Д.А., Оробей И.О., Кузьмицкий И.Ф. Численное исследование алгоритмов уменьшения интегрального насыщения // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – 2005. – Вып. XIII. – С.140–143.

УДК 681.515

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук; А. Г. Бирюков, инж.;
Н. В. Давидовский инж.; Т. А. Дайнеко, ассист. (БГТУ, г. Минск)

НАСТРОЙКА ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ

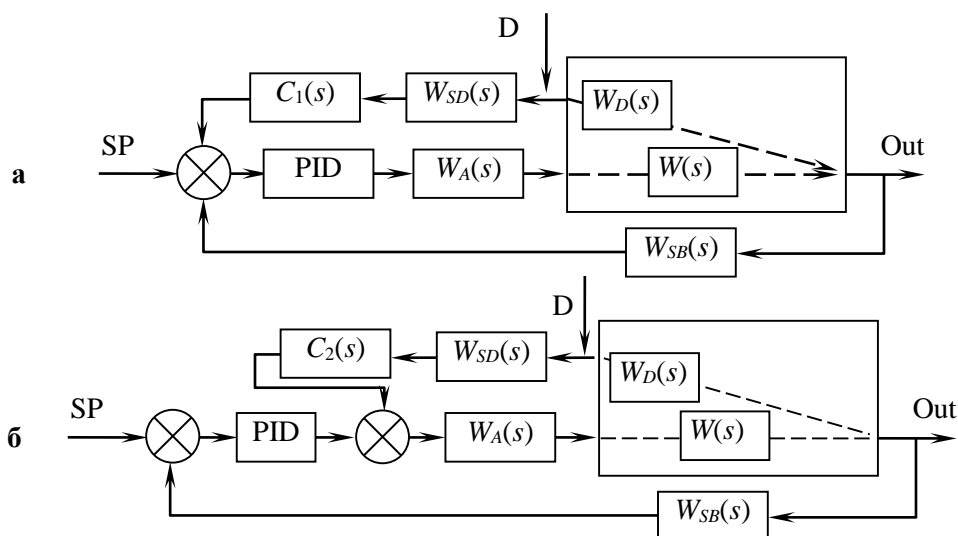
Решение вопросов построения надежных базисных систем управления позволяет в полной мере применить теоретические решения, которые разрабатывались в рамках теории автоматического управления. Решение вопросов усовершенствованного управления сейчас уделяется большое внимание. Однако непродуманная имплементация теоретических решений может приводить к разочарованию в возможностях повышения эффективности за счет усложнения систем управления.

Одним из таких решений является использование инвариантных или, как их иногда называют, комбинированных систем регулирования. Такие системы регулирования сочетают в себе достоинство двух элементарных решений систем управлений. Наличие обратной связи по выходному параметру обеспечивает требуемую точность, и устранить недостаток, который присущ разомкнутым системам управления. А использование компенсатора, в свою очередь, позволяет улучшить быстродействие систем с обратной связью. Конечно, построение всегда таких систем не всегда является выигрышным и возможным. На реальные объекты могут действовать различного вида возмущения измерение, который не возможно или слишком дорого. Те же проблемы наблюдаются и с обязательностью использования обратной связи.

В литературе наиболее часто встречаются две структуры построения инвариантных систем (рисунок 1). Расчетные формулы компенсаторов для них будут следующие:

$$C_1(s) = \frac{W_D(s)}{W(s) W_A(s) PID W_{SD}(s)}; \quad C_2(s) = \frac{W_D(s)}{W(s) W_A(s) W_{SD}(s)}$$

С точки зрения реализации в макетах математического моделирования они позволяют получить практически одинаковое качество регулирования, одна проектирование работы данных систем на реальные условия приводит к однозначному выбору.



$C(s)$ – передаточная функция компенсатора; $W_{SD}(s)$ – датчик контроля возмущения; D – сигнал возмущения; $W_D(s)$ – передаточная функция по каналу; $W(s)$ – передаточная функция основного канала; SP – сигнал задания; PID – передаточная функция регулятора обратной связи; $W_A(s)$ – передаточная функция исполнительного механизма; $W_{SB}(s)$ – передаточная функция датчика основного параметра; Out – основной выходной параметр

Рисунок 1 – Структурная схема управления процессом сушки

В прикладных условиях структура рисунок 1а обладает следующими недостатками:

1. Измерение любого возмущения сопряжено с наличием шумов, что может приводить к дополнительному напряжению в контуре стабилизации;
2. Ненулевое математическое ожидания приведет к фактическому изменению сигнала задания.
3. Абсолютное точное определение всех передаточных функций в канале обратной связи и в канале возмущения не возможно. В реальных объектах динамические характеристики меняются, как следствие это может приводить к эффекту, что и в предыдущем пункте.
4. Для расчета компенсатора требуется знание передаточной функции регулятора, однако в процессе эксплуатации часто перенастраивают регулятор или часто они эксплуатируется со включенной автоподстройкой, что потребует и изменение параметров компенсатора.

Вследствие выше указанных причин это предопределило наличие готовых шаблонов структуры рисунок 1, б в библиотеках современных программируемых логических контроллеров.

Следующей трудностью является реализуемость компенсаторов [1]. Эта проблема актуальна даже в варианте математического моделирования. Прямой расчет по вышеуказанным формулам может приводить к более вы-

сокому порядку в числителе по отношению к знаменателю. Также существуют проблемы при наличии запаздывания в основном канале стабилизации больше чем канале возмущения. Другая сторона – это реализация расчетной формулы в микропроцессорной технике регулирования. Даже если проблемы указанные в предыдущем абзаце не случились, реализация дифференциальных уравнений путем разностных уравнений в реальных условиях может привести (а часто так и бывает) к ухудшению качества функционирования. И основные причины здесь две: наличие шумов в измерительном тракте и постоянные флуктуации параметров передаточных функций $W_D(s)$ и $W(s)$. Поэтому при построении компенсаторов для систем управления технологическими процессами ограничиваются передаточными функциями первого порядка:

$$C_A = k; C_{LP} = \frac{k}{Ts+1}; C_{HP} = \frac{kS}{Ts+1}; C_{FP} = k \frac{T_1s+1}{T_2s+1},$$

где C_A – просто усилительное звено; C_{LP} – фильтр низкой частоты; C_{HP} – фильтр высокой частоты; C_{FP} – форсирующее звено.

Значение компенсаторов может быть определено разными способами. Выбор способа во много определяется наличием априорной информации. Если известен спектр помех возмущения, то стоит ориентировать на подавление основных гармоник возмущения. При известных передаточной функции компенсатора можно аппроксимировать ее переходную и ли частотную характеристики одним из вариантов простейших компенсаторов. Альтернативным вариантом может быть понижение порядка известными математическими методами. Универсальным методом является нахождение коэффициентов для выше указанных вариантов компенсаторов и сравнение результатов их работы путем минимизации интегральных критериев качества [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпович, Д. С. Особенности проектирования системы управления гиросtabilизированного опорно-поворотного устройства / Д. С. Карпович, И. О. Оробей, В. В. Сарока //Тезисы докладов 81-й научно-технической конференции, Минск, 1–12 февраля 2017 г. – Минск : БГТУ, 2017. – С. 78.

2. D. Hryniuk, I. Suhorukova, N. Oliferovich and I. Orobei, "Complex tuning of the PID controller according to integral criteria," 2018 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/eStream.2018.8394117.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОДБОР КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ МИНИМАЛЬНОГО ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЯ

Пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы широко распространены в технических системах и используются в 90–95% регулирующих контуров. Они позволяют достичь цели управления для большинства технологических объектов, при этом их структура компактна и проста. Ключевым вопросом в использовании ПИД-регулятора был вопрос настройки его коэффициентов.

С появлением ЭВМ, а следовательно, и программируемых логических контроллеров, SCADA-систем и распределенных систем управления (PCY) появились методы автоматической настройки ПИД-регуляторов, реализованные в этих системах, цель которых разовая настройка или настройка по запросу оператора регулятора в автоматическом режиме

Синтез ПИД-регулятора включает в себя несколько задач:

1. Выбор соответствующей структуры ПИД алгоритма (П, ПИ или ПИД)
2. Автоматическая настройка коэффициентов регулятора при помощи тюнинга
3. Моделирование контроллера с моделью объекта управления
4. Реализация контроллера на целевом процессоре

В данной методике предложен автоматический подбор интегральных коэффициентов ПИ регулятора в зависимости от заданных пропорциональных. Критерием выбора коэффициента регулятора является достижение заданного перерегулирования с учётом допустимого отклонения.

На первых двух итерациях цикла происходит полный перебор значений интегрального коэффициента, на третьем, в зависимости от направления изменения интегрального коэффициента, происходит его вычисление, исходя из предыдущего значения, что ускоряет процесс расчета.

Шаг изменения коэффициентов регулятора следует брать в зависимости от значений коэффициента передачи и постоянной времени объекта управления.

В качестве оптимального выбираются регулятор и с минимальным перерегулированием в замкнутой САУ.

В качестве передаточной функции объекта управления была рассмотрена модель, полученная на основе трендов изменения степень открытия клапана подачи теплоносителя и температуры пропарки в условиях ОАО «Светлогорский целлюлозно-картонный комбинат»:

$$G(s) = \frac{Kp}{(1+Tp1*s)(1+Tp2*s)}, \quad (1)$$

где $Kp = 1.8155$, $Tp1 = 5.4001*60$ сек, $Tp2 = 3.4199*60$ сек

Переходная характеристика для канала регулирования температуры пропарки представлена на рисунке 1

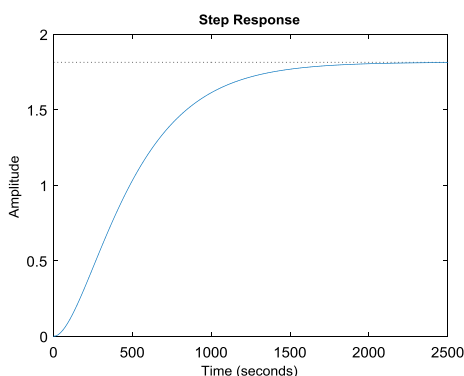


Рисунок 1 – Переходная характеристика для канала регулирования температуры пропарки

В результате расчётов были получены 10 передаточных функций ПИ регуляторов. Соответствующие этим передаточным функциям регулятора переходные характеристики САР будут представлены на рисунке 2.

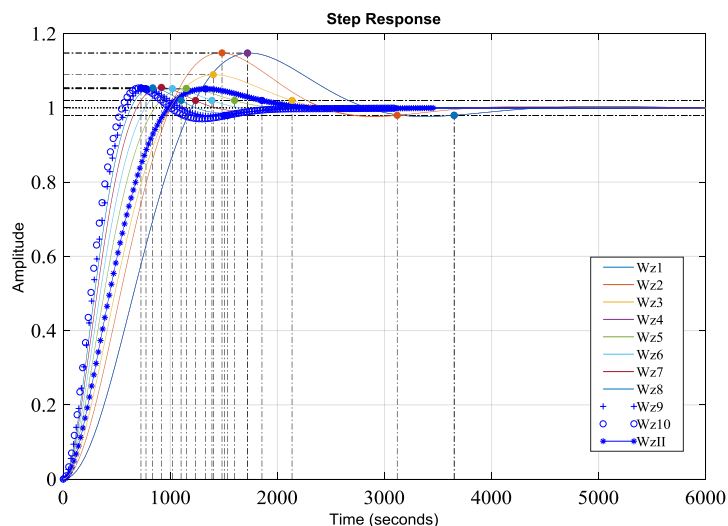


Рисунок 2 – Моделирование САР с различными параметрами регулятора

Исходя из анализа полученных результатов минимальное перерегулирование имеет САР с регулятором W_R ($K_p=0.4$, $T_i=760.1$). Передаточная функция ПИ регулятора с оптимальными коэффициентами имеет следующий вид:

$$W_R = \frac{0.4 s + 0.001316}{s} \quad (2)$$

УДК 62-52621.923

А. А. Лялько, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

ОБЗОР АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО- ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОР

В случае, если объект управления (ОУ) имеет нестационарные параметры необходимо постоянно или периодически подстраивать коэффициенты пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора под изменяющиеся параметры ОУ так, чтобы достигалась цель управления. Решение этой проблемы достигается с помощью адаптивного управления, которое в зависимости от алгоритма адаптации подразумевает постоянную или периодическую корректировку коэффициентов ПИД-регулятора.

Существующие алгоритмы адаптации разделяют на прямые и непрямые. Прямые алгоритмы корректируют коэффициенты ПИД-регулятора на основе анализа регулируемой переменной. Непрямые алгоритмы основываются на идентификации модели ОУ и корректировке на основе ее результатов коэффициентов ПИД-регулятора.

В прямых алгоритмах адаптивного управления параметры регулятора обновляются непосредственно, по определенному закону, который зависит от состояния замкнутой системы. Для того чтобы оценить состояние системы, используются различные подходы.

Прямые адаптивные системы, использующие логические правила настройки регулятора (rule-based), представляют целый подкласс систем управления. Принцип действия основан на имитации действий наладчика, который, анализируя состояние выхода системы при изменении задающего воздействия корректирует параметры ПИД-регулятора. Во время функционирования всегда ищется компромисс между наименьшим временем переходного процесса и запасами устойчивости.

Среди перспективных прямых алгоритмов адаптивного управления можно выделить следующие:

1. Алгоритм итерационной градиентной настройки (Iterative

feedback tuning) [1].

Данный алгоритм способен функционировать при непредсказуемых изменениях параметров ОУ, но при малых внешних возмущениях. Основная идея заключается в вычислении градиента по коэффициентам ПИД-регулятора относительно ошибки слежения. Для вычисления градиента метод использует ступенчатые испытательные воздействия, подаваемые на вход замкнутой системы. По вычисленному градиенту корректируются коэффициенты ПИД-регулятора.

2. Метод рекуррентных целевых неравенств [2].

Суть метода заключается в использовании целевых неравенств, зависящих от текущих и предыдущих значений измеряемых переменных, состояния ОУ и управления, построенных на основе выбранной цели управления. При функционировании алгоритма сразу все целевые неравенства не доступны, они возникают по ходу функционирования и поэтому решаются рекуррентно. Для решения рекуррентных целевых неравенств используются конечно сходящиеся алгоритмы, суть которых заключается в том, что при достижении цели управления коэффициенты закона управления перестают корректироваться.

Многие непрямые алгоритмы адаптации являются дальнейшим развитием алгоритмов автоматической настройки. Так, в ряде работ были развиты идеи идентификации крайней точки и предложено использовать метод наименьших квадратов для идентификации этой точки. Далее было предложено использовать несколько идентификаторов совместно с узкополосными фильтрами, что позволило улучшить алгоритм. Множество алгоритмов используют в своей основе метод наименьших квадратов, позволяющий идентифицировать различные модели ОУ. Для синтеза ПИД-регуляторов в части работ используются алгебраические методы синтеза, в другой части - методы оптимизации.

Среди прямых алгоритмов адаптивного управления можно выделить следующие:

1. Алгоритм адаптации по реакции системы на ступеньку [3].

Первоначальная настройка ПИД-регулятора осуществляется по результатам эксперимента в разомкнутом контуре, т.е. выполняется предварительная автоматическая настройка регулятора. Затем последующая коррекция коэффициентов ПИД-регулятора осуществляется по результатам анализа реакции системы на ступенчатое изменение задающего воздействия или управления, не превышающее 10% от номинального значения.

2. Алгоритм адаптации, использующие релейный подход.

Первоначальная настройка регулятора осуществляется с помощью замыкания ОУ двухпозиционным реле. Измеряется амплитуда и период возникших автоколебаний, по значениям которых затем синтезируется ПИД-

регулятор. При необходимости подстройки коэффициентов ПИД-регулятора двухпозиционное реле подключается параллельно с регулятором.

Перспективным направлением в развитии не прямых адаптивных алгоритмов управления является частотное адаптивное управление [4]. Идея данного подхода заключается в использовании полигармонического испытательного сигнала, подаваемого на вход системы управления. Такая необходимость возникает при недостаточно богатом гармониками задающим воздействием, например, если она постоянная величина все время. С помощью фильтра Фурье можно выделить полезную составляющую, несущую информацию об ОУ, и таким образом оценить параметры модели ОУ даже при интенсивных неизвестных внешних возмущениях. Существуют некоторые вариации такого подхода. В первой вариации на вход системы подается одна гармоника с частотой, равной резонансной частоте системы, и определяется амплитуда и фаза установившихся колебаний на входе и выходе ОУ, на основе которых определяются параметры модели ОУ. Для первоначального определения резонансной частоты системы предлагается возбудить автоколебания в системе управления с помощью двухпозиционного реле или путем увеличения коэффициента усиления регулятора. Во второй вариации используется двух- и более частотный испытательный сигнал. Частоты гармоник испытательного сигнала при этом должны находиться относительно далеко друг от друга. Этот подход позволяет оценивать параметры модели ОУ с более сложной структурой.

Несмотря на наличие совокупности достаточно разнообразных и неоднородных алгоритмов адаптивного управления, все еще остается достаточно большой разрыв между теорией и практикой. Тем не менее потребности промышленности с каждым годом растут, что вызвано увеличением темпов производства, изменением технологии и повышением гибкости. Во многом это факторы, которые, в конечном итоге, создадут благоприятный фон для повсеместного использования адаптивных ПИД-регуляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hjalmarsson H., Geers M., Gunnarsson S., Lequin O. Interactive feedback tuning: theory and applications // *IEEE Control Syst. Magazin*. 1998. V. 18. P. 26–41.
2. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981.
3. Шубладзе А.М., Кузнецов С.И. Автоматически настраиваемые промышленные ПИ и ПИД-регуляторы // *Автоматизация в промышленности*. 2007. № 2. С. 15–17.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов, 5-е издание. перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2008.

М. Ю. Подобед, ст. преп., канд. техн. наук;
Д. Е. Сидорчик, ст. преп.; В. А. Стоцкий, ассист. (БГТУ, г. Минск)

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА В Г. МИНСКЕ

Температура наружного воздуха оказывает серьезное воздействие на состояние здоровья человека, сельское хозяйство и некоторые технологические процессы в промышленности.

Изменение климата может приводить как к отрицательным, так и положительным эффектам в сельском хозяйстве. В зависимости от погодных условий напрямую изменяется урожайность, начинают появляться зоны рискованного земледелия и длительные засушливые периоды. Изменение климата непосредственно повлияет на деревообрабатывающую, легкую, пищевую, медицинскую и другие виды промышленности. Все выше перечисленные факторы требуют повсеместной адаптации во всех областях народного хозяйства и жизнедеятельности человека.

По полученным статистическим данным [1] в работе была проанализирована по нескольким параметрам динамика изменения климата в г. Минске за период с 2005 по 2019 годы.

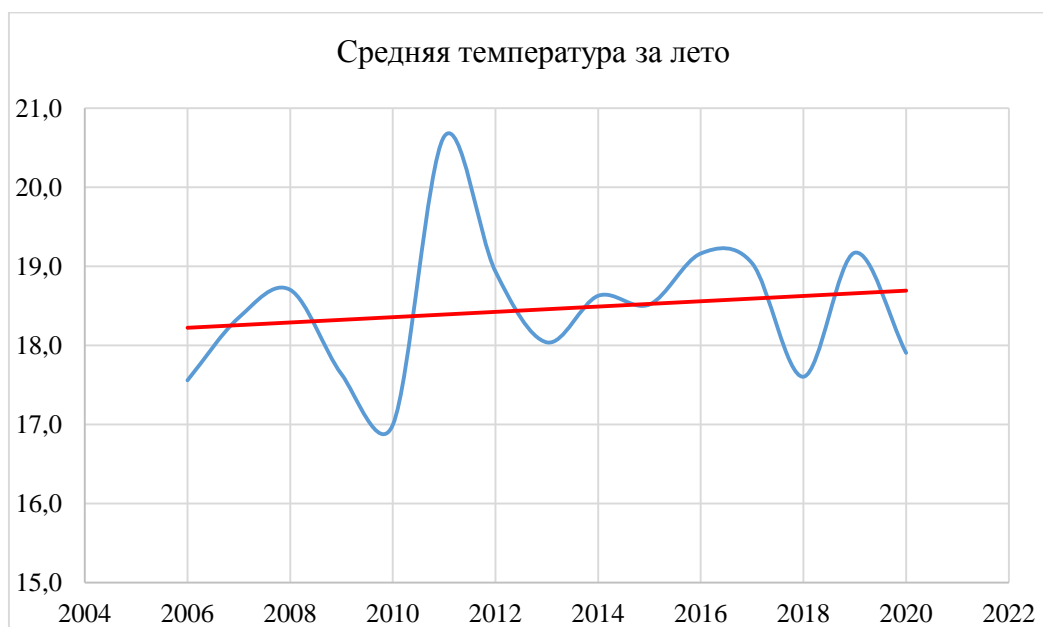


Рисунок 1 – Изменение средней температуры за летний период

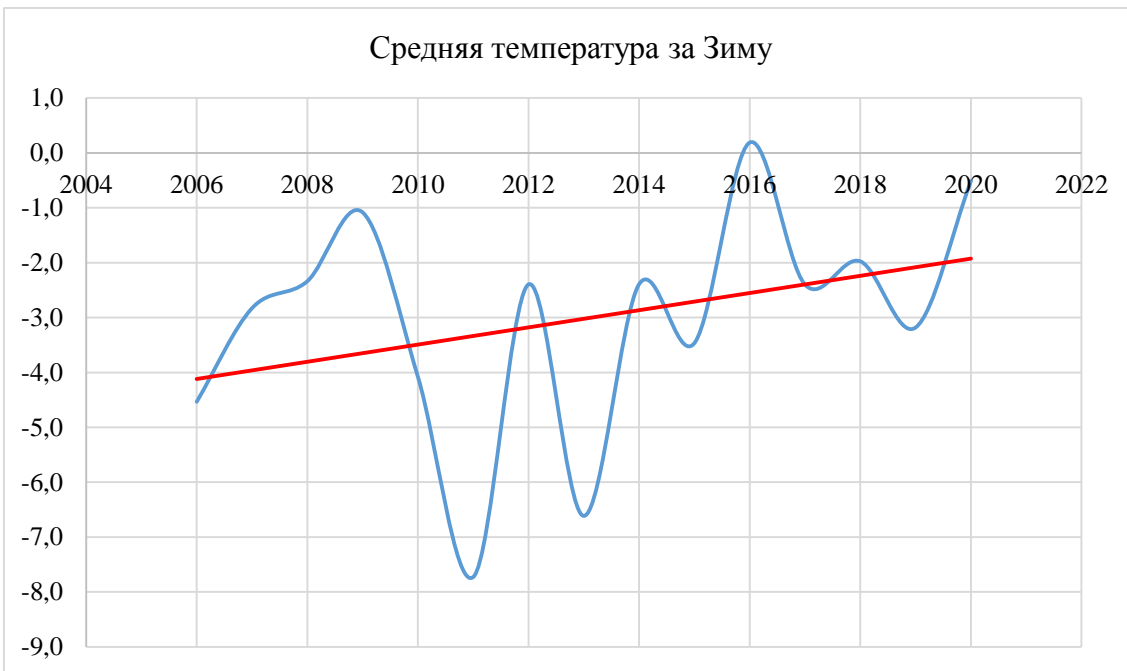


Рисунок 2 – Изменение средней температуры за зимний период



Рисунок 3 – Количество дней в году с температурой более 25 градусов

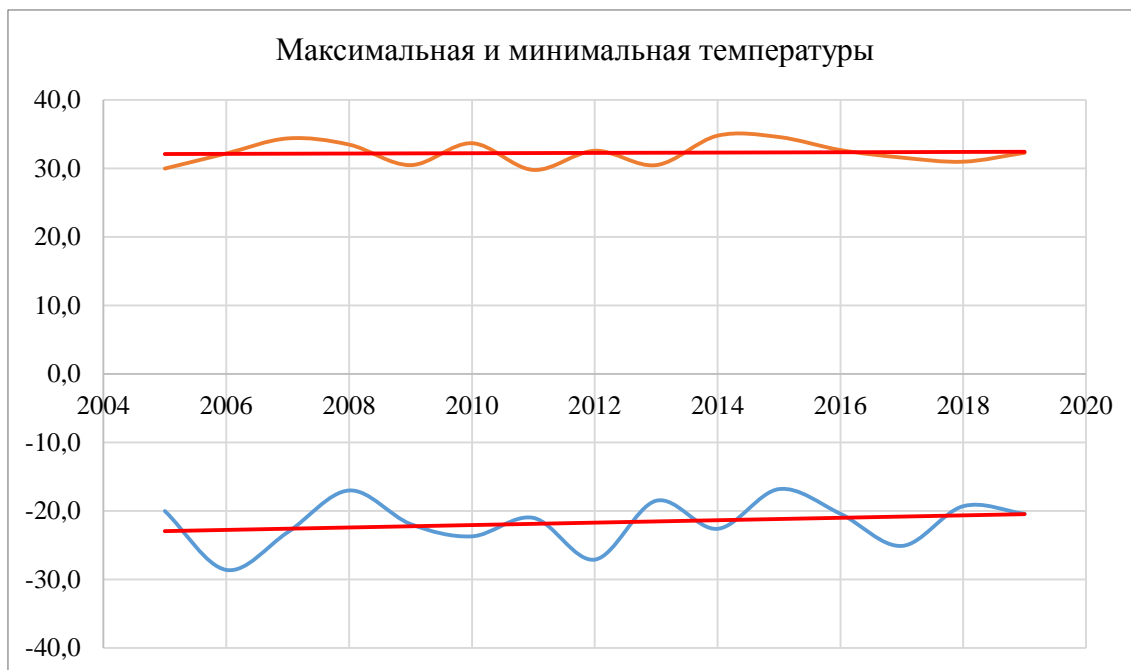


Рисунок 4 – Динамика изменения максимальной и минимальной температур за год

За период с 2005 по 2019 годы в Минске:

- 1) средняя температура увеличилась на 1 градус;
- 2) средняя температура за зиму в Минске увеличилась более чем на 2 градуса;
- 3) количество дней с температурой более 25 градусов увеличилось с 25 до 40.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информационные ресурсы «POGODA.BY» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pogoda.by/315/arch.php>. – Дата доступа: 16.02.2021

КОНСТРУКЦИИ СОВРЕМЕННЫХ МОДУЛЬНЫХ АВТОМАТОВ

На белорусском электротехническом рынке на протяжении долгого времени присутствуют модульные автоматические выключатели с четырьмя полыми заклепками. Подобные автоматы присутствуют в линейках многих брендов нижнего и среднего ценового диапазона: ИЭК (до 2007), ЕКФ, TDM, CHINT, DEKraft (до 2016 года), GENERICA, ЕТР (рисунок 1), SHCET, Крэзисервис и у многих других.

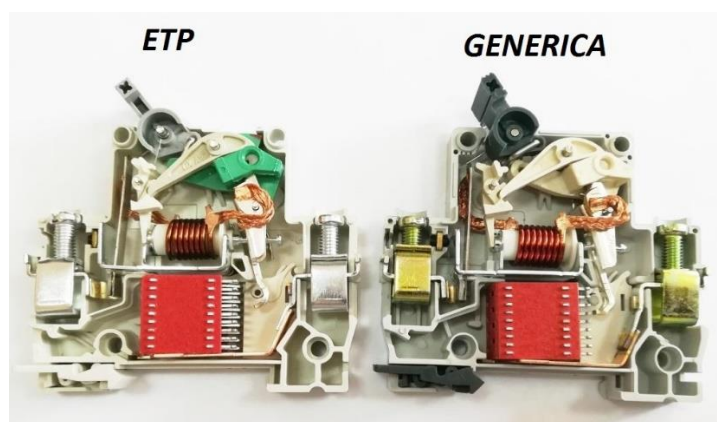


Рисунок 1 – Конструкции модульных автоматов
ЕТР и GENERICA

Автоматические выключатели такой конструкции так же имеются на российском, белорусском, украинском и, как минимум, на казахском рынках, где они продаются также под десятками малоизвестных местных брендов. Помимо четырех полых заклепок эти автоматические выключатели объединяют следующие конструктивные особенности: наличие двух гибких токопроводящих “косичек”, аналогичные механизма свободного расцепления, дугогасительная решетка с небольшим количеством пластин.

Отличаться они между собой могут:

1. материалом, из которого изготовлены клеммные зажимы;
2. возможностью опломбирования рукоятки управления;
3. надписями на передней и боковых панелях;
4. окошком индикации состояния;
5. монолитной или с швом лицевая панель и др.

В дальнейшем конструкция данных автоматов претерпела ряд незначительных изменений и доработок. Так, например, появился ИЭК ВА 47 со следующими доработками

- 1) пламегасители выполнены в виде перегородок;

- 2) индикатор состояния контактов;
- 3) безступенчатый переход от контакта к токопроводу;
- 4) изменена форма корпуса и дизайн.

Так же дальнейшим предложением можно считать автоматы ЕКФ Proxima, Юпитер и др., но в них изменения в основном касались лишь формы корпуса и дизайна.

В результате патентного анализа оказалось, что 3 октября 1980 в европейском патентном ведомстве компанией Merlin Gerin под номером EP0027404A1 был зарегистрирован патент под названием "Miniature electric circuit breaker in moulded case". Если внимательно присмотреться к конструкции заявляемого автомата, то все ранее перечисленные современные автоматы являются его копией с незначительными отличиями.

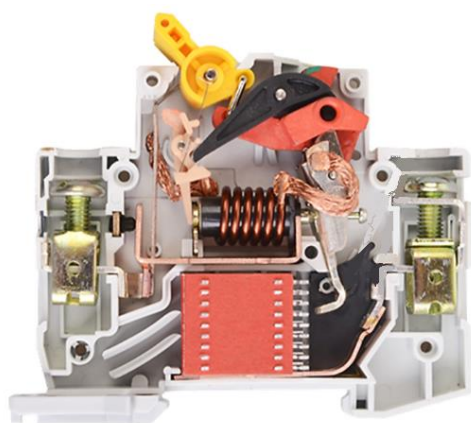


Рисунок 2 – Конструкция модульного автомата IEK BA 47

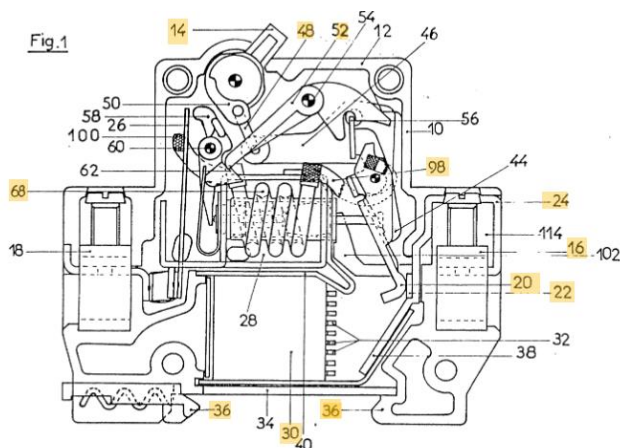


Рисунок 3 – Конструкция модульного автомата Merlin Gerin

В 1992 году компания Merlin Geri была приобретена Schneider Electric и данные автоматы некоторое время выпускались под брендом Schneider Electric.

ЛИТЕРАТУРА

1. Miniature electric circuit breaker in moulded case. EP0027404A1 European Patent Office [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/EP0027404A1/en?q=EP0027404A1>. – Дата доступа: 16.02.2021.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОБЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ АГРЕГИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ В ERP-СИСТЕМАХ

Координация уровней производства и служб, включенных в ERP-систему, возможна на использовании в критерии агрегирования показателя измерения общей эффективности оборудования OEE (Overall Equipment Effectiveness). С его помощью можно получить информацию на важнейший для управления промышленным предприятием вопрос: каким путем можно рационально увеличить выпуск продукции не вводя дополнительных мощностей. Показатель OEE ($OEE = A * P * Q$) возможно также использовать для оценки эффективности ERP-систем, т.к. он позволяет агрегировать три базовых производственных фактора:

– готовность A (Availability) – учет потерь, связанных с простоями оборудования DTL (Down Time Loss). Включает внеплановые остановки: поломки и отказы оборудования, остановки из-за дефицита сырья или отсутствия места для складирования. Учитывается также время плановых остановок PSD (Planned Shut Down), т.е. время, которое необходимо исключить из анализа эффективности, поскольку производство в этот момент невозможно. Разница между общим временем работы предприятия и временем плановых остановок называется планируемым производственным временем PPT (Planned Production Time) $PPT = POT - PSD$, где POT (Plant Operating Time) общее время работы предприятия. Учитывает время переходов, т.к. оно является одной из форм простоя. Его невозможно устранить, но возможно сократить. Фактически отработанное рабочее время, оставшееся после учёта остановок, называется операционным временем (Operating Time, $OT = PPT - DTL$). $A = OT / PPT$;

– производительность P (Performance) – учет потерь, связанных с уменьшением скорости производства SL (Speed Loss). $P = (\text{количество произведенной продукции} / \text{время работы}) / (\text{норма производства в час})$;

– качество Q (Quality) – учет потерь, связанных с низким качеством продукции QL (Quality Loss). $Q = (\text{количество качественной продукции}) / (\text{количество произведенной продукции})$. Причем, при агрегировании критериев качества должен учитывать потери в качестве, которые включают в себя производство несоответствующей стандартам продукции.

При расчете общей эффективности оборудования (ОЕЕ) за основу примем промышленное предприятие полного цикла (две смены по десять часов). За 10 рабочих дней фиксировалось время простоев оборудования по любым причинам (таблица 1).

Таблица 1 – Простой и брак при выпуске продукции

День	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Всего
Простой (мин)	98	311	252	131	226	61	149	315	246	212	2001
Брак(т)	0	2	3,3	1,5	1,3	0	1	3,8	2	5	19,9
Партия(т)	795	683	799	922	556	737	911	645	646	662	7356
Выработка(т)	795	681	795	920	554	737	910	641	644	657	7334

В нашем примере РОТ будет равно рассматриваемому периоду умноженному на рабочее время обоих смен, то есть: $10 \cdot 10 \cdot 2 = 200$ часов. Если учитывать плановые остановки в 1 час каждый день, то PSD будет равно: $1 \cdot 10 = 10$ часов. Тогда $PPT = 200 - 10 = 190$ часов. Именно такое время предприятие предполагает потратить на производство продукции. Для нашего случая $DTL = 2001$ мин. или 33.35 часа. Следовательно, $OT = 190 - 33,35 = 156,65$. Отсюда критерий доступности равен: $A = 156,65 / 190 = 0,8245$ или 82.45%. Критерий производительности будет равен: $P = (7356 \cdot 1) / (156,65 \cdot 60) = 0.782$ или 72,8% для времени цикла 1 т/мин. Соответственно, критерий качества равен: $Q = 7334 / 7356 = 0.997$ или 99,7%. Таким образом общая эффективность будет равна: $OEE = 0.8245 \cdot 0.782 \cdot 0.997 = 0.643$ или 64.3%.

По мировому стандарту World Class Manufacturing, рассчитываемые критерии должны быть: $A \geq 90\%$, $P \geq 95\%$, $Q \geq 99\%$ и $OEE \geq 85\%$. По показателю Q уровень высокий (99,7%), но остальные показатели хуже, т.е. высокий уровень качества не гарантирует высокий уровень эффективности работы предприятия. Для повышения эффективности производства следует эффективно внедрять системы быстрой переналадки и автоматизированной системы сбора данных.

О. Г. Барашко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
А. В. Овсянников, доц., канд. техн. наук (БГУ, г. Минск)

СРАВНЕНИЕ КОНЦЕПЦИЙ ТРАДИЦИОННОЙ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ERP-СИСТЕМ

Традиционные ERP-системы сильно адаптированы к потребностям конкретных организаций. Невозможность быстро ввести новые переменные или произвести изменение без остановки системы, приводит к тому, что организациям обычно приходится тратить огромное количество времени и ресурсов на переобучение моделей.

И настоящее время осуществляется появление интеллектуальных ERP-продуктов (i-ERP), главной задачей которых поддержка процессов цифровой трансформации организаций благодаря использованию облачных и мобильных технологий, предикативной аналитики, машинного обучения и углубленной автоматизации бизнес-процессов на их основе.

Ключевое требование производства как к традиционным ERP-системам, так и i-ERP в целом заключается в их способности оперативно поддерживать изменения. Если раньше постулировалось, что можно автоматизировать только стабильные бизнес-процессы, и срок внедрения ERP в несколько лет никого не пугал, то сегодня это выглядит как явный анахронизм.

Чтобы обеспечить гибкость и адаптивность традиционным ERP предстоит измениться и стать не монолитными жесткими системами, а гибкими модульными платформами. На уровнях SCADA и MES-систем начинают применяться инструменты IoT, IIoT (Industrial Internet of Things) и Big Data, используемых для достижения требуемой точности анализа больших массивов данных с полевого уровня. На уровне ERP-систем благодаря развитию инновационных облачных технологий и широкому проникновению мобильности реализуется вариант федерализованной слабо связанной архитектуры, приводящей к тому, что большая часть функциональности существует в виде облачных сервисов и быстро автоматизируемых бизнес-процессов.

В i-ERP будет использоваться технология машинного обучения (ML), т.е. совокупности математических методов, позволяющих получать решение некоторых задач с помощью общих алгоритмов, не написанных специально под выполняемую задачу. Алгоритмы машинного обучения универсальны и не привязаны к конкретному производству либо отрасли экономики. С помощью такой технологии компьютер можно научить выявлять определенные закономерности, встречаясь с

которыми, он будет выполнять определенные действия: например, выявление на конвейере бракованных изделий или сегментирование потенциально высокодоходных потребителей.

С помощью решений на базе ML можно выстроить систему предиктивной аналитики в таких традиционно «скучных» областях, как бухгалтерия, закупки, аналитика и пр. Использование искусственного интеллекта внутри базовых ERP-решений фактически ведет к роботизации целых профессий, когда некоторые бизнес-процессы целиком могут проходить без участия человека (например, сведение счетов, выставленных клиентам, с поступившими платежами).

Изменения затронут и пользовательский интерфейс i-ERP благодаря достижениям в области обработки естественного языка (Natural Language Processing – NLP) на основе методов глубокого обучения. – это обучение многоуровневых («глубоких») нейронных сетей на больших объемах данных, позволяющих исключить работу по созданию признаков для машинного обучения. Под обработкой естественных языков NLP понимается создание систем, обрабатывающих или «понимающих» язык в целях выполнения определенных задач. Эти задачи могут включать в себя: формирование ответов на вопросы; анализ эмоциональной окраски высказываний; нахождение текста, соответствующего изображению (генерацию подписи к входному изображению); машинный перевод; распознавание речи; морфологическую разметку; извлечение сущностей. Подобные механизмы начинают реализовываться в i-ERP и у разработчиков открывается много возможностей для улучшения пользовательских интерфейсов и автоматизированной обработки информации.

Среда развертывания i-ERP-систем также имеет важное значение. Развертывание систем в публичных облаках имеет как свои плюсы, так и свои минусы. Если производство небольшое или среднее, если нет крупных и сложных производств с установленными MES-системами, нет большого количества датчиков, объединенных в IoT, то, возможно, публичное облако окажется оптимальным вариантом. К очевидным плюсам публичных облачных решений можно отнести легкую и быструю масштабируемость ресурсов и отсутствие (или значительно меньшее количество) капитальных затрат на старте проекта.

Однако в случае сбора данных со всех уровней сложного производства (который, в свою очередь, описывается стандартом ISA-95), возникают определенные трудности интеграции всевозможных полевых (и не только) систем с ERP-системой из облака.

А. В. Овсянников, доц., канд. техн. наук (БГУ, г. Минск);
О. Г. Барашко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ФИЛЬТРАЦИЯ ГИСТОГРАММНОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ НА ОСНОВЕИ НЕЧЕТКОЙ ПРИНАДЛЕЖНО- СТИ ДАННЫХ ИНТЕРВАЛУ ГРУППИРОВАНИЯ

Гистограммная оценка плотности распределения вероятности (ПВ) – одна из самых распространенных, исторически первых и общепринятых элементов описательной, прикладной статистики, в частности, в сфере статистической радиотехники, задачах ЭМС. Проблематика, связанная с гистограммной оценкой (ГОСТ Р 50.1.033-2001 Прикладная статистика) в прикладной статистике, также хорошо известна. В стационарном случае, при исследовании стационарных временных рядов, эффективность гистограммной оценки связана лишь с наличием достаточного времени для ее получения. Если же исследуется нестационарный объект или нестационарный временной ряд и требуется более точное распознавание момента времени, когда состояние объекта или динамика ряда, характеризуемая распределением, значительно изменилась, то построение простой, быстрой и эффективной гистограммной оценки ПВ является актуальным.

Развитие непараметрических методов и общая направленность тематики работ в области непараметрических процедур оценивания ПВ (ядерная, проекционная, сплайн и др.) не исключает применения гистограммных оценок, например переменных, к числу которых относятся и полиграммные. Одной из проблем «правильного» распознавания ПВ, наряду с выбором количества интервалов группирования данных, является возможная «изрезанность» гистограммы, что особенно характерно при относительно небольших наборах данных. Решение этой проблемы заключается в применении гистограммных фильтров, например усредняющего, медианного, гауссовского и др. Однако, их применение интуитивно и исходит в основном из практической целесообразности. В представляемой работе предлагается теоретически обоснованная методика построения гистограммного фильтра, учитывающая следующие соображения.

Во-первых, можно отказаться от строгой единичной функции включения данных в конкретный интервал группирования. Данные могут находиться вблизи границ интервала и при изменении числа интервалов оказаться в другом интервале. Расположение данных на интервале группирования (близость или удаленность от границ интервала),

может интерпретироваться как нечеткая принадлежность данных конкретному интервалу.

Во-вторых, введение понятия нечеткой принадлежности данных интервалу группирования позволяет за счет весовых функций перегруппировать эти данные так, чтобы уменьшилась «изрезанность» гистограммы и тем самым обеспечивалась ее сглаженность.

Для построения гистограммного сглаживающего фильтра и установления качественных свойств взвешенной гистограммной оценки определим коэффициент статистической взаимосвязи между числом v_j и числом $u_{Aj} = \sum_{x_i \in A_j} \mu_j(x_i)$, которое соответствует

взвешенному числу данных попавших в j -тый интервал. Площадь столбца j -того интервала при стандартной гистограммной оценке составляет величину $v_j \Delta_x$, а площадь такого же столбца в случае ВГО составит $u_{Aj} \Delta_x = \sum_{x_i \in A_j} \mu_j(x_i) \Delta_x$. Отношение этих площадей при асимпто-

тически больших значениях v_j и u_{Aj} (большом покрытии данными интервала A_j) будет стремиться к устойчивому соотношению в виде коэффициента статистической взаимосвязи

$$k = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{\sum_i \mu_j(x_i)}{\sum_i I_j(x_i)} = \frac{\bar{u}_{Aj}}{\bar{v}_j} = \frac{1}{\Delta_x} \int_{\Delta_x} \mu_j(x) dx. \quad (1)$$

Черта над символом в формуле (1) означает, что эти числа получены при асимптотически большом покрытии данными интервала A_j и их отношение стремится к пределу в виде коэффициента k . Тот же результат можно получить в общем случае, используя усреднение функции принадлежности

$$k = \bar{u}_{Aj} / \bar{v}_j = \int_{\Delta_x} \mu f dx / \int_{\Delta_x} f dx.$$

Ограничиваясь первым членом разложения в ряд Тейлора ПВ в точке середины интервала группирования x_j , получим результат, совпадающий с (1). Формула (1) справедлива для внутренних интервалов гистограммы ($j = 2, m-1$). Для конечных интервалов $j = 1, m$, исходя из условий нормировки (2) и в том случае, если $\Delta_\mu = x_{j+1} - x_{j-1}$, получим

$$k_e = \Delta_x^{-1} \left(\int_{\Delta_x/2} 1(x) dx + \int_{\Delta_x/2} \mu(x) dx \right) = (1+k) / 2. \quad (2)$$

С учетом определенных формулами (1), (2) коэффициентов. k , k_e можем записать соотношение между числами \bar{v}_j и \bar{u}_j , которое будет представлять собой *гистограммный фильтр нулевого порядка* в одномерном случае

$$\begin{cases} \bar{u}_j = \alpha \bar{v}_{j-1} + k \bar{v}_j + \alpha \bar{v}_{j+1}, & j = \overline{2, m-1}, \\ \alpha = \bar{u}_{Aj-1} / \bar{v}_{j-1} = \bar{u}_{Aj+1} / \bar{v}_{j+1} = (1-k) / 2, \\ \bar{u}_1 = k_e \bar{v}_1 + (1-k_e) \bar{v}_2, & \bar{u}_m = (1-k_e) \bar{v}_{m-1} + k_e \bar{v}_m. \end{cases} \quad (3)$$

Заменой переменных \bar{v}_j , \bar{u}_j на $g_j = v_j / \Delta_x n$, и f_j^* , получим гистограммный фильтр относительно значений ПВ на интервале группирования данных

$$\begin{cases} f_j^* = \alpha g_{j-1} + k g_j + \alpha g_{j+1}, & j = \overline{2, m-1} \\ f_1^* = k_e g_1 + (1-k_e) g_2, & f_m^* = (1-k_e) g_{m-1} + k_e g_m. \end{cases} \quad (4)$$

Введением итеративной процедуры для формул (3). (4) можно добиться большей степени сглаживания

$$\begin{cases} \bar{u}_j^{q+1} = \alpha \bar{u}_{j-1}^q + k \bar{u}_j^q + \alpha \bar{u}_{j+1}^q, & j = \overline{2, m-1} \\ \bar{u}_1^{q+1} = k_e \bar{u}_1^q + (1-k_e) \bar{u}_2^q, & \bar{u}_m^{q+1} = (1-k_e) \bar{u}_{m-1}^q + k_e \bar{u}_m^q, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_j^{*q+1} = \alpha f_{j-1}^q + k f_j^{*q} + \alpha f_{j+1}^{*q}, & j = \overline{2, m-1} \\ f_1^{*q+1} = k_e f_1^{*q} + (1-k_e) f_2^{*q}, & f_m^{*q+1} = (1-k_e) f_{m-1}^{*q} + k_e f_m^{*q}, \end{cases} \quad (6)$$

где q – порядковый номер итерации, $q=1$ соответствует процедуре (3). (4).

Используя аналогичный подход в фильтрации многомерных данных, в частности, гистограмм изображений, получаем теоретически обоснованные результаты.

В. П. Кобринец, доц., канд. техн. наук;
Н. П. Коровкина, доц., канд. пед. наук;
Н. Н. Пустовалова, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК ОСНОВА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Энергосбережение на предприятии является одной из самых актуальных проблем, с которой сталкивается промышленность. Это связано с постоянным ростом стоимости на электроэнергию.

Основными потребителями энергии на современных промышленных предприятиях являются электрические приводы, устанавливаемые на машинах и механизмах. Их доля потребления составляет порядка 80% от общего количества потребляемой электроэнергии. В их числе доля механизмов с асинхронным приводом составляет примерно 75% и постепенно продолжает увеличиваться. Это связано с тем, что в асинхронных электродвигателях применяются самые современные электропроводящие и изоляционные материалы, позволяющие значительно экономить энергию в местах их использования. В зависимости от типа электропривода энергосберегающие мероприятия различаются между собой. Они разделяются на две группы.

Нерегулируемые электроприводы потребляют большое количество энергии. Поэтому основной упор делается на повышение коэффициента полезного действия (КПД) за счет использования в их конструкции современных электро- и магнитопроводящих материалов. По сравнению со стандартными двигателями старых моделей КПД новых приводов увеличилось примерно на 7-10%. Общая экономия электроэнергии, получаемая данными двигателями за весь период эксплуатации, составляет около 40%. Окупаемость дополнительных средств, вложенных в улучшение технических характеристик, наступает в период от 1 до 3 лет.

Регулируемые электроприводы применяются в системах вентиляции, тепло- и водоснабжения, имеющих циклический характер работы. В течение рабочего дня разница нагрузок на такие двигатели может достигать до 80%. Поэтому в этих системах применяются электроприводы с регулировкой мощности, которая требуется для работы в тот или иной момент. Чтобы выполнять необходимые регулировки, применяются преобразователи частоты. С их помощью происходит изменение соотношений частоты и напряжения, поступающих к двигателю. В результате потребляемая мощность начинает точно соответствовать нагрузке.

Система «электронный преобразователь частоты – короткозамкнутый асинхронный двигатель» в настоящее время является оптимальным техническим решением массового электропривода. Она особенно привлекательна на стадии модернизации предприятия: сохраняется все существующее оборудование, но между сетью и двигателем включается новый элемент – преобразователь частоты. Из всей электроэнергии, потребляемой электроприводом, 40% приходится на электроприводы насосов и вентиляторов.

В данной работе рассматривается эффективность энергосберегающих мероприятий на предприятиях при замене асинхронных двигателей частотно-регулируемыми на приводах насосов и вентиляторов.

За критерии оценки приняты такие показатели, как экономия электроэнергии в год (ΔW) и срок окупаемости ($C_{ок}$).

Потребляемая электрическая мощность (P_f) до установки частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) определялась по производительности насоса; номинальному напору, развиваемым насосом; по коэффициентам полезного действия двигателя и насоса. Экономия электроэнергии определялась с учетом производительности оборудования. В таблице приведены данные по расчету годовой экономии электроэнергии (ΔW) и сроку окупаемости ($C_{ок}$) при работе установок с ЧРЭП мощностью ($P_ч$) при сравнении с обычным электроприводом мощностью (P_f) для насосных и вентиляционных агрегатов в зависимости от мощности электродвигателей.

Таблица

P_f , кВт	$P_ч$, кВт	ΔW , кВт·час	$C_{ок}$
30	15	45500	0,3
35	9,6	129540	0,65
55	34	219670	0,7
58	34	92160	0,73
71	51,4	75264	1,3
140	101	149760	1,2
200	91	954840	1,1

Исследование мероприятий по замене асинхронных двигателей частотно-регулируемыми показало значительное сокращение потребления электроэнергии и повышение экономической эффективности технологических процессов на промышленных предприятиях при небольшом сроке окупаемости необходимых затрат.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА DOBOT MAGICIAN

В данное время все больше появляются разновидностей манипуляторов с различными возможностями, как на физическом уровне, так и на программном.

Наша задача проанализировать функциональные возможности робота-манипулятора Dobot Magician.

Данный комплекс может управляться и программироваться с помощью пульта управления или от главного компьютера через программную среду Dobot Studio.

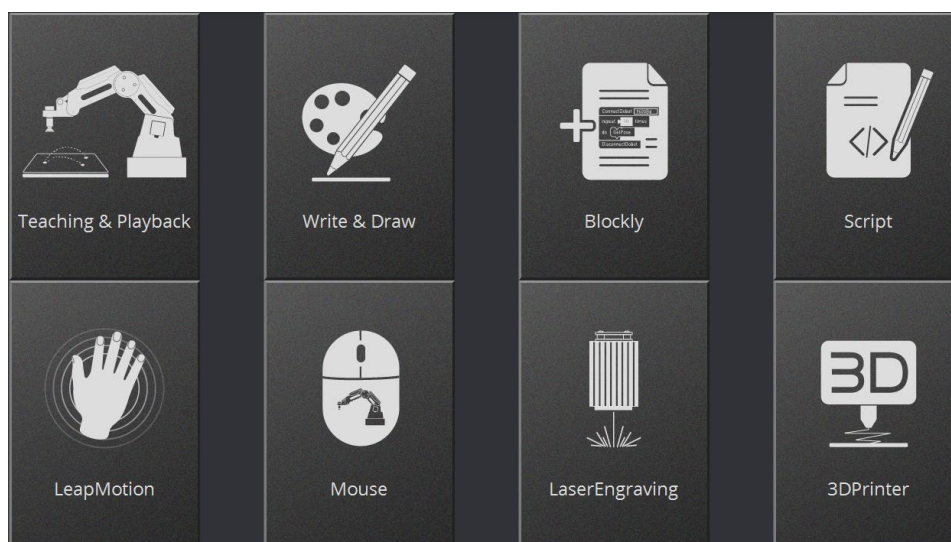


Рисунок – Рабочий функционал Dobot Studio

Комплекс Dobot Magician программируется на языках: Google Blockly, Python, Java (Android), C/C++/C#, LabView и Objective-C (iOS, MacOS) [1].

Ниже представлен script подпрограммы определения цвета деталей на языке Python.

```
def rgb():
global ColorSensor_X, ColorSensor_Y, ColorSensor_Z, R, G, B, MAX, Place_X, Plac-
ingInterval, Place_Y, Place_Z, RedCount, GreenCount, BlueCount
dType.SetPTPCmdEx(api, 0, ColorSensor_X, ColorSensor_Y, ColorSensor_Z, 0, 1)
dType.SetWAITCmdEx(api, 1, 1)
R = dType.GetColorSensorEx(api, 0)
G = dType.GetColorSensorEx(api, 1)
B = dType.GetColorSensorEx(api, 2)
MAX = max([R, G, B])
if MAX == R:
```

```

print('Red')
dType.SetPTPCmdEx(api, 0, (Place_X + PlacingInterval), Place_Y, (Place_Z + Red-
Count), 0, 1)
RedCount = RedCount + 25
elif MAX == G:
print('Green')
dType.SetPTPCmdEx(api, 0, Place_X, Place_Y, (Place_Z + GreenCount), 0, 1)
GreenCount = GreenCount + 25
else:
print('Blue')
dType.SetPTPCmdEx(api, 0, (Place_X - PlacingInterval), Place_Y, (Place_Z + Blue-
Count), 0, 1)
BlueCount = BlueCount + 25
dType.SetEndEffectorSuctionCupEx(api, 0, 1)
dType.SetWAITCmdEx(api, 1, 1)
STEP_PER_CRICLE = 360.0 / 1.8 * 10.0 * 16.0
MM_PER_CRICLE = 3.1415926535898 * 36.0
vel = float(50) * STEP_PER_CRICLE / MM_PER_CRICLE
dType.SetEMotorEx(api, 0, 1, int(vel), 1)

```

Исследуя функциональные возможности комплекса Dobot Magician сравнили два основных языка программирования для данного манипулятора, также были выявлены достоинства и недостатки каждого из них. С использованием программного обеспечения был реализован процесс распознавания цвета деталей, их перемещение и последующее комплектование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dobot Magician. User Manual. – Shenzhen Yuejiang Technology Co.,Ltd., 2018/2/9, v.1.2.5, p.138.

И. О. Оробей, канд. техн. наук, доц.;
Д. А. Гринюк, канд. техн. наук, доц.;
М. А. Анкуда, ст. преп., Н. М. Олиферович, ассист. (БГТУ г. Минск)

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ИНФОРМАЦИИ ОТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АВТОДИНА

Схема автодина с параметрическим возбуждением представляет собой усилитель мощности, в котором энергия от изменения реактивного параметра преобразуется в энергию сигнала. Усиление в параметрическом усилителе происходит за счет внесения генератором накачки в сигнальный контур условного отрицательного сопротивления, которое зависит от амплитуды накачки. Обратная связь реализуется через подачу сигнала после усиления на управляющий электрод варикапа, который является частью колебательного контура. Данный генератор имеет параметрическую обратную связь с частотой накачки равной удвоенной частоте сигнала [1]. Поскольку шум является обратно пропорциональной величиной частоте сигнала, то подобное удвоение необратимо приводит к повышению соотношения полезного сигнала к шумовой составляющей, но целиком от нее не избавляет от шумовой составляющей.

Для обработки в режиме реального времени слабых сигналов с нестационарным характером шумов и помех в измерительной технике можно использовать цифровые адаптивные фильтры (АФ). Применение АФ актуально при использовании для обработки сигнала контроллеров с быстродействующим аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). В существующих методах цифровой адаптивной фильтрации применяют фильтры скользящего среднего с изменяемыми весовыми коэффициентами, имеющие конечную импульсную характеристику (КИХ), причем весовые коэффициенты выбирают по вектору ошибки или невязки из перестраиваемой матрицы коэффициентов, рассчитывают на основе минимизации ошибок градиентным методом с поисковым определением компонент градиента или определяют методом наименьших квадратов. Фильтр с КИХ требует большого объема памяти для хранения усредняемых значений и матрицы весовых коэффициентов и имеет ограниченное возрастание точности с течением времени даже при соблюдении модельных и реальных значений сигнала и шума [2].

Сущность предложенного цифрового АФ основывается на использовании аналого-цифрового преобразования сигнала с последующей фильтрацией полученной цифровой последовательности с дополнительной локальной аппроксимацией некоторой длины временной последовательности квадратичной или линейной зависимостью и определением интегральных значений показателя скорости и ускорения. Полученные значения вместе с суммой квадратов отклонений позволяют спрогнозировать временной параметр для формирования выходного значения на данном такте измерения.

Данный способ можно отнести к методам локальной аппроксимации. Суть этого метода состоит в использовании скользящих локально-параметрических моделей, в качестве которых предлагается использовать линейную и квадратичную аппроксимации:

$$y(t) = c_1 + c_2 t$$

$$y(t) = d_1 + d_2 t + d_3 t^2$$

где

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_2 & w_1 \\ w_3 & w_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_3 & w_2 & w_1 \\ w_4 & w_3 & w_2 \\ w_5 & w_4 & w_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix};$$

$$w_i = (t_1)^{i-1} + (t_2)^{i-1} + \dots + (t_N)^{i-1};$$

$$b_i = (t_1 x_1)^{i-1} + (t_2 x_2)^{i-1} + \dots + (t_N x_N)^{i-1}.$$

Данные уравнения является результатом применения метода наименьших квадратов и, в отличие от других весовых функций, не требует большого количества вычислений.

Для формирования выходного значения y_i может быть использовано любое значение времени t в диапазоне аппроксимации

$$t_k = [0 \quad \Delta t \quad 2\Delta t \quad \dots \quad (N-2)\Delta t \quad (N-1)\Delta t],$$

где Δt – время квантования.

В зависимости от величины N и особенности шумов, t_k имеет свое оптимальное значение. Проведенные исследования показали, что

$$E = |y_i(t_s) - y_s|,$$

имеет параболическую зависимость, минимум которой находится в первой половине диапазона аппроксимации, где $y_i(t_s)$ – значение параметра в любой момент времени $t = t_s$ в диапазоне аппроксимации t_k , y_s – истинное значение параметра.

Функциональная схема АФ приведена на рисунке 1.

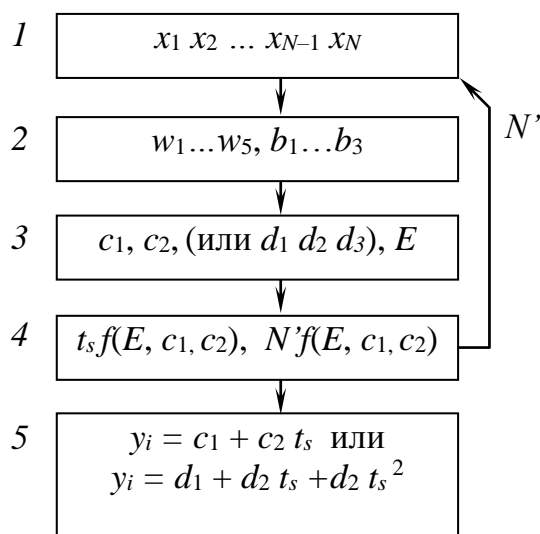


Рисунок 1 – Автономная работа адаптации

Работа адаптации предполагает проведение постоянных расчетов по линейной или параболической аппроксимации. Блок 1 запоминает требуемую длину последних значений отсчетов АЦП в соответствии с окном аппроксимации N , блок 2 производит расчет значений $w_1 \dots w_5, b_1 \dots b_3$, блок 3 производит расчет c_1, c_2 (или d_1, d_2, d_3) и вычисление величины дисперсии отклонения E значений от аппроксимированных кривых. Блок 4 позволяет осуществлять выбор между линейной и квадратичной аппроксимацией и их параметрами. Блок 5 реализует аппроксимацию.

Метод наименьших квадратов следит за адекватностью выбранного решения, поскольку минимизация данной суммы говорит и о минимальных отклонениях результатов аппроксимации от истинных значений контролируемого параметра. Эта особенность позволяет производить постоянное обучение фильтра под изменяющие условия и изменять функции $t_s f(E, c_1, c_2), N' f(E, c_1, c_2)$

ЛИТЕРАТУРА

1. Анкуда, М. А. Модель автодина с параметрическим возбуждением / М. А. Анкуда, И. О. Оробей // Труды БГТУ. - Минск : БГТУ, 2016. - № 6 (188) 2016 год. - С. 127-131
2. Фильтр с адаптацией по вероятностному критерию / И. О. Оробей [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. - Минск : БГТУ, 2020. - № 1 (230). - С. 50-56

И. О. Оробей, канд. техн. наук, доц;
 В. В. Сарока, канд. техн. наук, доц;
 М. А. Анкуда, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОЧНЫХ ЯМР-РАСХОДОМЕРОВ

Меточный однокатушечный ЯМР-расходомер относится к измерителям с временным разделением процессов отметки и регистрации. Принцип устройства состоит в пространственном совмещении датчика меток и анализатора. При этом анализатор периодически превращается в датчик меток, а спиновый детектор – в генератор нутации, в тоже время измерительным участком является участок, проходящий через катушку регистрации. Структурная схема ЯМР-измерителя расхода с временным разделением процесса отметки и регистрации представлена на рисунке 1 [1].

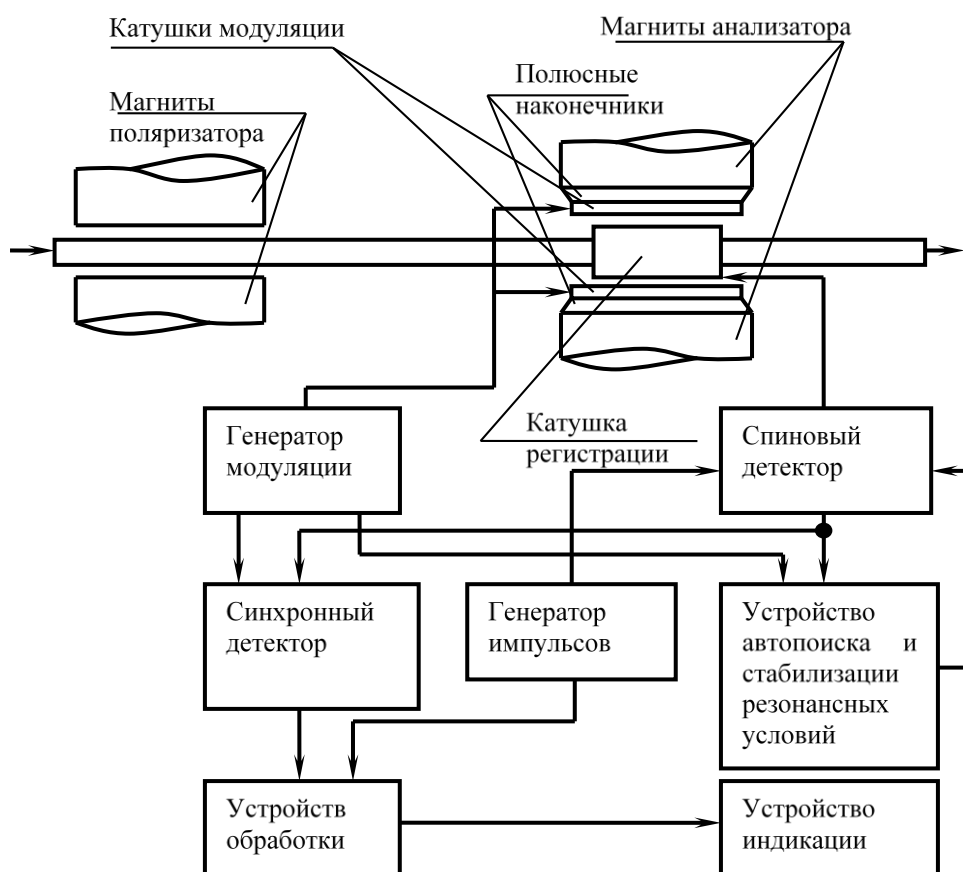


Рисунок 1 – Структурная схема меточного однокатушечного ЯМР-расходомера

Измеритель работает следующим образом. Поляризация жидкости производится в поле, создаваемом магнитами поляризатора. Сигнал ЯМР наблюдается периодически, для чего используется модулирующее синусоидальное поле звуковой частоты, создаваемое катушками модуляции, от генератора модуляции. Анализ вектора намагниченности движущейся жидкости производится при помощи катушки регистрации, соединенной со спиновым детектором, во время отсутствия импульса на выходе генератора импульсов; при этом обеспечивается оптимальная для регистрации сигнала ЯМР амплитуда радиочастотного резонансного поля, создаваемого катушкой регистрации.

Погрешность определения информативного параметра смежна с напряжением шумов в тракте регистрации

$$\delta t_{\Pi} = A_{\text{ш}} / (dA/dt),$$

где $A_{\text{ш}}$ – амплитуда шумовых флуктуации сигнала ЯМР; dA/dt – скорость изменения интенсивности в момент регистрации отметки.

Снижение погрешностей достигается в расходомерах с плоским распределением скоростей на выходе поляризатора и с малой длиной транспортного и измерительного участков, не обеспечивающей формирование ламинарного или турбулентного потоков. Снизить погрешности можно корректировкой выходного сигнала по вязкости. Для технических жидкостей корректировка может проводиться по температуре, которая связана с индукцией поля анализатора.

Для измерения температуры можно использовать постоянные магниты анализатора, находящиеся в тепловом контакте с жидкостью. Постоянным магнитам присуща зависимость параметров от температуры. Аналогично зависит от температуры индукция в зазоре магнитной системы. Магнитометр можно выполнять на датчике Холла (ДХ) [2]. Тогда выход магнитометра будет являться базовым сигналом корректора характеристики преобразования для автопоиска и стабилизации резонансных условий в анализаторе.

ЛИТЕРАТУРА

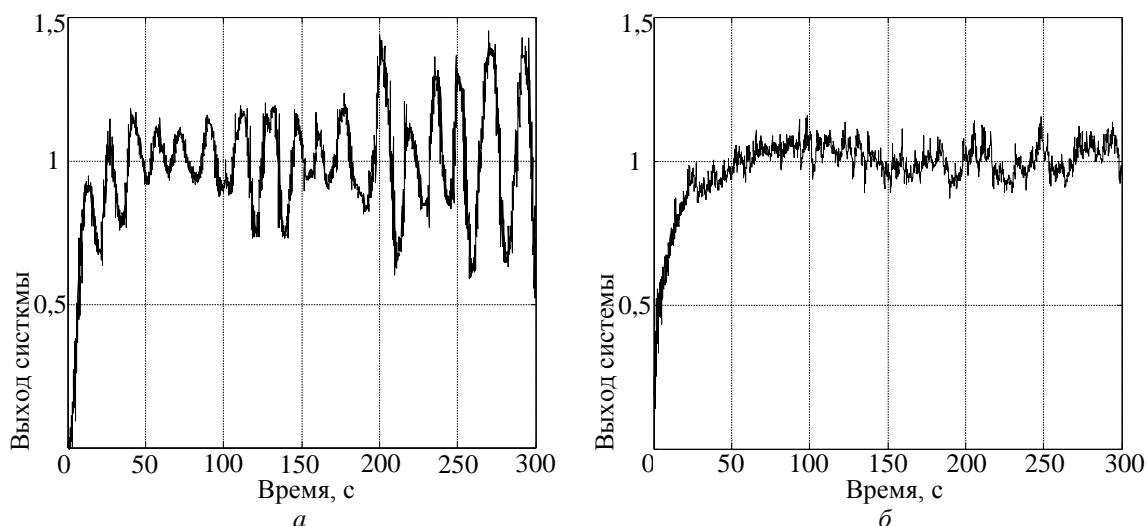
1. Анкуда М. А. Анализ работы меточного однокатушечного ЯМР-измерителя расхода жидкостей / М. А. Анкуда // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – 2008. – Вып. XVI. – С. 99–102
2. Меточный ЯМР - расходомер временного типа с совмещением адаптации системы регистрации к измеряемому расходу и коррекции измерительной базы по индукции поля анализатора / В. В. Сарока, О. И. Оробей, Д. А. Гринюк, М. А. Анкуда, И. О. Оробей // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – 2009. – Вып. XVII. – С. 73–76.

А. Н. Шумский, ассист.;
Д. С. Карпович, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
И. А. Хаусов, проф., д-р техн. наук (ВГУИТ, г. Воронеж)

АНАЛИЗ ШУМОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛА И БОРЬБА С НИМИ

Зачастую при получении информации о состоянии объекта управления по каналам управления наряду с полезным сигналом присутствует помеха. Наличие помехи обусловлено присутствием шумов при работе средства измерения, наличием помех в линиях связи и др.

Как показали результаты исследований, проведенных в пакете Simulink программы MatLab, использование системы управления с переключениями позволяет существенно снизить влияние шумовых составляющих на выходной сигнал. Ниже на рисунке приведены два графика переходного процесса, позволяющие оценить характер изменения выходного сигнала.



**Рисунок 1 – Графики переходного процесса системы
с ПИ-регулятором (а) и ПИ-подобным нечетким регулятором (б)**

Как видно из графиков переходного процесса, представленного на рисунке 3, система управления с нечетким ПИ-подобным регулятором позволяет существенно снизить вариацию выходного сигнала в установившемся режиме, а также уменьшить колебательность переходного процесса системы.

Д. Удрис, проф., д-р техн. наук
(ВГТУ, г. Вильнюс, Литовская Республика);

Д. С. Карпович, канд. техн. наук;

М. Д. Карпович, студ.;

А. С. Михновец, студ. (БГТУ, г. Минск)

СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Для надежной работы системы автоматического управления очень важно правильно выбрать исполнительные механизмы перемещения регулирующих органов. При этом необходимо учитывать следующее: тип регулирующего органа, обеспечение рабочего диапазона его перемещения (характеризуется оборотом выходного вала или ходом его штока), требуемого быстродействия, достаточного пускового момента, работы привода при перегрузках, точности в процессе работы (характеризуется величиной инерционного выбега выходного вала), возможности применения при изменяющихся внешних условиях (например, повышенных температуре и влажности), относительной простоты эксплуатации, надежности в работе, значительного срока службы.

Передаточная функция исполнительного механизма следующая:

$$W_{им}(p) = \frac{k_{им}}{T_{им} \cdot p + 1},$$

Для исполнительного механизма имеем $k_{им}$ - коэффициент усиления и постоянную времени - $T_{им}$.

В некоторых случаях, когда исполнительный механизм постоянно формирует управляющее воздействие на объект управления, необходимо контролировать его температуру и формировать воздействие на исполнительный механизм с учетом температурного режима работы силового элемента. Снижение длительности цикла работы, а, следовательно, и повышение длительности цикла паузы приведет к снижению точности работы системы управления, но при этом может снизиться тепловая нагрузка на силовой элемент. Эту особенность можно учитывать при синтезе систем автоматического управления.

С. Г. Тихомиров, проф., д-р техн. наук
(ВГУИТ, г. Воронеж, РФ);

О. А. Джумаев, проф., д-р техн. наук
(НГИ, г. Навои, Республика Узбекистан);

Д. С. Карпович, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);

С. С. Карпович, канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАНАЛОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СИНТЕЗЕ ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ

В настоящее время появилось большое количество технологических параметров, измерение которых представляет собой не непрерывный, а периодический процесс. Это может быть обусловлено как необходимостью отбора проб, так и специфическими преобразованиями, необходимыми для получения комплексного параметра. До настоящего времени при синтезе автоматических контуров регулирования технологическим процессом такие контуры измерения не включались в структуру системы управления, и компенсация производилась вручную оператором с учетом периодического измерения и экспертной оценки оператора.

С учетом широкого распространения в современных системах управления компенсирующих каналов, а также глубокой теоретической проработке основ функционирования инвариантных систем возникает возможность синтеза систем управления, в которых влияние возмущающей составляющей можно снизить за счет использования рассмотренных выше каналов периодических измерений.

В настоящее время контроль за содержанием в отходящих абгазах летучих органических веществ осуществляется лабораторным способом с помощью химика-лаборанта. Данный способ является не рациональным, так как занимает много времени на оценку качества отходящих газов в атмосферу, что может привести к непоправимому вреду окружающей среде в случае превышения допустимого значения концентрации вредных веществ содержащихся в абгазах.

Была синтезирована новая система автоматического регулирования на базе программируемого логического контроллера ВЕСКНОFFс использованием спектрохроматографа Кристалл 5000, который осуществляет контроль за содержанием вредных органических веществ, поступающих из установки. С учетом этого синтезирована инвариантная система управления процессом.

Д. Е. Сидорчик, ст. преп.;
М. Ю. Подобед, ст. преп., канд. техн. наук;
А. А. Королёв, ассист.; И. С. Шетько, студ. (БГТУ, г. Минск)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ARDUINO, STM32 И ESP32

Все, кто пользуется микроконтроллерами Arduino, знакомы с вопросом экономии. Однако покупать китайские платы от неизвестных производителей в надежде, что хоть часть из них будет работать как заявлено, - не лучшая стратегия. Но среди множества не особо выдающихся микроконтроллеров можно найти и достойную дешёвую замену Arduino - STM32, которая уже стала известной в своих кругах.

Одним из самых популярных микроконтроллеров в нынешнее время является Arduino. И главное из них известно всем, кто работал с данным чипом и его собратьями – собственная экосистема. Большое количество пользователей подразумевает и широкий программный функционал, лишь небольшая часть которого предоставляется самими производителями, простота использования, чем нельзя сказать про микроконтроллеры STM32, и простое программирование под Atmel, без необходимости учить все тонкости языка на практике. Ну а более опытные пользователи оценят EEPROM, идущий с коробки.

По техническим характеристикам Arduino проигрывает STM32. Тактовая частота микроконтроллеров Arduino ниже – 16 МГц против 72 МГц STM32. Количество выводов GPIO у STM32 больше. Объем памяти у STM32 также выше. Стоит отметить pin-to-pin совместимость STM32 – для замены одного изделия на другое не нужно менять плату. Но полностью заменить Arduino конкуренты не могут. В первую очередь это связано с высоким порогом вхождения – для работы с STM32 нужно иметь базис. Платы Arduino более распространены, и, если у пользователя возникает проблема, найти решение можно на форумах. Также для Arduino созданы различные шилды и модули, расширяющие функционал. Несмотря на преимущества, по соотношению цена/качество выигрывает STM32.

Семейство микроконтроллеров STM32 отличается от своих конкурентов отличным поведением при температурах от -40С до +80 С. Высокая производительность не уменьшается, в отличие от Arduino. Также можно найти изделия, работающие при температурах до 105 С.

Esp32 - совершенно новое поколение микроконтроллеров, пришедшее на смену Arduino. Архитектура - у ESP - 32 бита, у Arduino - 8. Процессор совершенно новый, двухъядерный. Одно ядро занимается только связью, второе обрабатывает пользовательский код. Частота - 240 МГц, что в 15 раз выше, чем у Arduino. И есть еще один ULP (ультра-маломощный) процессор, который работает на частоте всего 32 кГц в режиме сна. У него есть своя небольшая (16 Кб) память, свой набор команд, многого он не умеет, но может разбудить основной процессор. Оперативной памяти - 520 Кб, что в 260 раз больше, чем на Arduino. Энергонезависимая программная память - 448 Кб что тоже выгодно отличается от Arduino, там 32 кб. Есть флэш в 4Мб, до 16 в некоторых версиях.

В ESP32 на борту есть WiFi, Bluetooth с поддержкой BLE. В Arduino этого нет. По входам-выходам тоже хорошее преимущество: 36 штук, вместо 14 на Arduino, а аналоговых - 18 вместо 6, и оцифровка входящего сигнала 12-битным АЦП, а не 10-битным, что дает 4096 уровней, вместо 1024. Также присутствует ЦАП, в отличие от Arduino, 4 SPI, 2 I2C, 2 I2S и 2 UART. Интерфейс для тачскрина и датчик Холла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информационный ресурс «ARDUINOMASTER» https://arduinomaster.ru/stm32/stm32-mikrokontroller-dlya-achinayushhih-posle-arduino/#_STM32_Arduino;
2. Информационный ресурс «ARDUINOMASTER» <https://arduinoplus.ru/stm32-i-arduino-sravnenie/>;
3. Информационный ресурс «ELECTRONICPARTS» <https://electronicparts.ru/ustrojstva/sravnenie-mikrokontrollerov-arduino-i-stm32.html>;
4. Информационный ресурс «HABR» <https://habr.com/ru/post/191054/>.

УДК 681.5

С.А. Овцов, ассист. (БГТУ, г. Минск);

А.С. Рассылкин, проф., д-р техн. наук
(ТТУ, г. Таллин, Эстония);

Г. Л. Демидова, доц., канд. техн. наук
(Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, РФ)

В.В. Кишкурно, зам. ген. дир. (ОАО СЦКК, г. Светлогорск)

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ОТКЛОНЕНИЯ ГРУЗА ОТ ВЕРТИКАЛИ

При разработке систем управления процесса транспортировки груза часто необходимо синтезировать такую систему, которая бы обеспечила минимальное колебания груза, подвешенного с помощью каната к движущейся тележке. При этом синтезируемая система должна обеспечивать малое время перемещения, ограниченное или предельно допустимым значением, либо полученным уже решением (неоптимальным) к моменту решения задачи.

Для получения заданного управления был использован метод динамического программирования Беллмана. Сначала были определены критерии оптимальности движения автооператора по двум различным параметрам: минимизация колебаний подвески и повышение быстродействия работы автооператора.

Полученные результаты показали снижение амплитуды колебаний груза по сравнению с традиционной системой, на треть увеличилось быстродействие системы, сохранив при этом на прежнем уровне максимальное угловое отклонение груза. При этом частота колебаний груза увеличилась. Это обусловлено тем, что модифицированная система управления не допускает раскачивания груза при больших, по сравнению с работой традиционной САУ, ускорениях движения тележки за счет пульсирующего режима работы привода. В предлагаемой системе привод работает в импульсном режиме переключений с большими и меньшими значениями мощности, что позволяет с одной стороны уменьшить амплитуду колебаний груза, но с другой стороны при этом увеличивается частота колебаний груза.

А. Ю. Кушель, А. А. Касач, П. Б. Кубрак,
И. М. Жарский, И. И. Курило
(БГТУ, г. Минск, Беларусь)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Гальванические покрытия на основе сплавов меди с оловом благодаря своей высокой электропроводимости, коррозионной устойчивости и электрокаталитической активности широко используются в электротехнике, автомобильной промышленности, в производстве нагревательных устройств. Широкое практическое применение получили покрытия желтой бронзой, используемые для защиты от коррозии гидравлических деталей, водонагревательных элементов. Такие сплавы являются более дешевой и экологически безопасной альтернативой никелю в составе многослойных покрытий (Cu–Ni–Cr) [1–3].

Классические сульфатные электролиты бронзирования содержат, г/дм³: CuSO₄·5H₂O – 20–50; SnSO₄ – 30–50; H₂SO₄ – 50–120. Для получения качественных и однородных покрытий в их состав вводят специальные органические добавки. Одним из недостатков сульфатных электролитов является их низкая кроющая способность. Перспективным направлением для увеличения кроющей и рассеивающей способности электролитов, получения гальванических покрытий с улучшенными функциональными и декоративными свойствами, а также для интенсификации катодных процессов является использование нестационарных режимов электролиза (НЭ).

Целью нашей работы является изучение влияния параметров импульсного электролиза (ИЭ) на кроющую способность сернокислого электролита бронзирования и особенности процесса катодного нанесения сплавов Cu–Sn.

Состав используемого сернокислого электролита для электрохимического нанесения сплавов Cu–Sn представлен в таблице 1. В качестве источника ИЭ использовали потенциостат-гальваностат Р40Х. Катодами служили пластины из фольгированного медью диэлектрика, анодами – медь марки М0. Электроды предварительно обезжиривали в растворе следующего состава, г/дм³: Na₂CO₃ – 30, Na₃PO₄·12H₂O – 30; затем подвергали травлению в течение 15 секунд в растворе, содержащем, моль/дм³: HNO₃ – 400; H₂SO₄ – 400, NaCl – 10.

Таблица 2 – Состав сернокислого электролита осаждения сплава Cu–Sn

Компонент	Содержание в электролите, моль/дм ³	Назначение компонента
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,16	источник Cu ²⁺
SnSO ₄	0,19	источник Sn ²⁺
H ₂ SO ₄	1,00	фоновый электролит
тиомочевина	6,60 · 10 ⁻⁵	блескообразующая добавка
N–октилпиридиний бромид	1,80 · 10 ⁻⁵	выравнивающая добавка

Для оценки влияния режимов импульсного электролиза и величины токовой нагрузки на качество сплавов Cu-Sn, формируемых из исследуемого сернокислого электролита, были получены покрытия в интервале катодных плотностей тока 1,25–2,75 А/дм² с шагом 0,25 А/дм². Интервалы катодных плотностей тока i_k , обеспечивающих получение желтых покрытий Cu-Sn при различных режимах импульсного электролиза представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Диапазоны катодных плотностей тока, обеспечивающие получение качественных желтых покрытий Cu-Sn

Скважность	Время импульса, мс	Время паузы, мс	Диапазоны i_k , А/дм ²
Стационарный	–	–	1,25–1,50
2,0	10	10	1,75–2,75
	100	100	1,75–2,75
	1000	1000	1,75–2,50
1,5	10	5	1,50–2,50
	100	50	1,50–2,50
	1000	500	1,50–2,25
1,25	10	2,5	1,25–1,75
	100	25	1,25–1,75
	1000	250	1,25–1,50

Согласно полученным данным, в стационарном режиме при катодной плотности тока, не превышающей 1,25 А/дм², осаждаются покрытия розового цвета. Повышение плотности тока до 1,50 А/дм² способствует формированию полублестящих желтых покрытий. Увеличение катодной плотности тока свыше 1,5 А/дм² приводит к получению серых матовых покрытий.

Использование ИЭ способствует существенному увеличению интервалов катодных плотностей тока, обеспечивающих получение качественных желтых покрытий Cu-Sn. При частоте тока 50 Гц и скважности импульсов 2 желтые покрытия с однородной и мелкозернистой

структурой формируются в интервале i_k от 1,75 до 2,75 А/дм². Покрытия, полученные при токовой нагрузке более 2,75 А/дм² характеризуются неоднородной структурой. Использование режимов импульсного электролиза с более низкой скважностью импульсов тока (1,5 и 1,25) способствует формированию качественных мелкозернистых покрытий желтого цвета в более узком диапазоне плотностей токов, чем при использовании режима ИЭ при скважности 2. Также необходимо отметить, что снижение частоты тока для всех исследуемых режимов приводит к уменьшению диапазона рабочих плотностей тока.

Таким образом, использование ИЭ при соотношении времени импульса ко времени паузы 2:1 и частоте импульсов 66.7 Гц является наиболее целесообразным с точки зрения величин действительной токовой нагрузки и интервала рабочих плотностей тока импульса, при которых формируются качественные электрохимические покрытия Cu–Sn.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hedberg Y. S. et al. Surface passivity largely governs the bioaccessibility of nickel-based powder particles at human exposure conditions //Regulatory toxicology and pharmacology. – 2016. – Vol. 81. – P. 162-170.
2. Zhou N., Wang S., Walsh F. C. Effective particle dispersion via high-shear mixing of the electrolyte for electroplating a nickelmolybdenum disulphide composite //Electrochimica Acta. – 2018. – Vol. 283. – P. 568-577.
3. Survila A. et al. Codeposition of copper and tin from acid sulphate solutions containing polyether sintanol DS-10 and benzaldehyde //Journal of applied electrochemistry. – 2009. – Т. 39. – №. 10. – С. 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТРИЭТИЛАЛЮМИНИЙ-ТРИПРОПИЛАРСИН И ТРИЭТИЛИНДИЙ-ТРИПРОПИЛАРСИН

Совместный пиролиз алкильных производных элементов III и V групп находит широкое применение при получении пленок полупроводников. В этом плане значительный интерес представляет механизм процессов, протекающих в соответствующих бинарных системах.

При исследовании процессов протекающих при изучении образования арсенида галлия в результате взаимодействия триметилгаллия с арсином было установлено образование промежуточных продуктов $(\text{CH}_3)_{3-x}\text{GaAsH}_{3-x}$ с выделением метана [1]. Аналогичные процессы протекают при получении нитрида галлия при взаимодействии триэтилгаллия с аммиаком [2]. На основании этих отрывочных данных, был сделан вывод, что получение полупроводниковых структур через образование промежуточных соединений является общей закономерностью при термическом разложении металлоорганических соединений [3] чем и объясняются преимущества метода.

Ранее при изучении термораспада в бинарной системе триэтилгаллий—триэтиларсин [4] нами было показано, что алкильные производные галлия и мышьяка разлагаются по совершенно независимым механизмам. Исследование другой системы триметилгаллий-диэтиларсин [5] показало, что напротив, соединения вступают в реакцию между собой с образованием нового соединения.

Целью настоящих исследований было дальнейшее изучение особенностей термораспада в бинарных системах алкильных производных III и V групп. В качестве алкильных производных III группы был выбран триэтилалюминий и триэтилиндий. Триэтилалюминий разлагается по молекулярному, олефино-гидриднему механизму [6]. Триэтилиндий разлагается по радикально-цепному механизму [7]. Трипропиларсин также разлагается по радикально-цепному механизму [8].

Исследования обеих систем проводились при мольном соотношении компонентов 1:1 и суммарной мольной концентрации в системе триэтилалюминий-трипропиларсин 0,012 моль/л, триэтилиндий-трипропиларсин 0,008 моль/л. Выбор исходной концентрации диктовался давлением насыщенных паров компонентов, их термической стабильностью и приростом давления при термораспаде.

Исследования процесса разложения проводилось при постепенном подъеме температуры.

По данным на участках где происходил термораспад были рассчитаны константы скорости уравнения первого порядка которые составили: для триэтилалюминия $1.18 \cdot 10^{-5}, \text{с}^{-1}$, (опыт 1) а при аналогичном изучении термораспада самого триэтилиндия $1.10 \cdot 10^{-5}, \text{с}^{-1}$, для триэтилиндия $2,48 \cdot 10^{-5}, \text{с}^{-1}$ (опыт 2), а в работе [7] $2,54 \cdot 10^{-5}, \text{с}^{-1}$. Таким образом, полученные в данной работе данные по термораспаду для триэтилалюминия и триэтилиндия практически совпадают с кинетическими параметрами термораспада для триэтилалюминия и триэтилиндия [7].

После окончания опытов оба нуль-манометра были охлаждены до температуры жидкого азота. В опыте 1 давление составляло Па, что указывало на присутствие водорода в продуктах термораспада. В опыте 2 давление было равно 0, что указывало на отсутствие водорода и метана. Затем нуль-манометры были вскрыты и был определен состав продуктов термораспада. В опыте 1 он был следующим моль/л: водород 50,2, этан 8,6, этилен 26,7, пропилен 1,0, бутан 0,3, бутены 10,5, ΣC_6 2,7. В опыте 2 моль/л: этан 74,5, этилен 1,0, пропан 1,2, пропилен 0,9, бутан 18,2, бутены 1,8, ΣC_5 1,2, ΣC_6 0,9. То есть состав продуктов термораспада триэтилалюминия и триэтилиндия практически такой же, как при термораспаде индивидуальных соединений [7]. Содержание продуктов превращений пропильных радикалов такое-же, как в продуктах термораспада индивидуальных триэтилалюминия и триэтилиндия

На основании этих данных можно считать, что присутствие трипропиларсина не влияет на скорость и механизм разложения триэтилалюминия и триэтилиндия.

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод о том, что термораспад триэтилалюминия и триэтилиндия протекает независимо от наличия в системе трипропиларсина. Образование донорно-акцепторных комплексов не оказывает никакого влияния на термическое разложение в системах, не зависимо от механизма разложения соединения алюминия и индия. На основании наших и литературных данных можно сделать вывод, что разложение в системах алкильных производных элементов III и V групп может протекать как с образованием промежуточных газообразных продуктов, так и без их образования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schlyer D.A., Ring M.A // J.Organometal. Chem., 1976, Vol.144, Vol.144, N 1, p. 9-12.
2. Andrews J.E., Littlejohn M.F. // J.Electrochem. Soc., 1975, Vol. 122, N9, p. 1273-1275.
3. Грибов Б.Г., Домрачев Г.А., Жук Б.В. Осаждение пленок и покрытий разложением металлоорганических соединений. М.: Наука, 1981. 322 с.

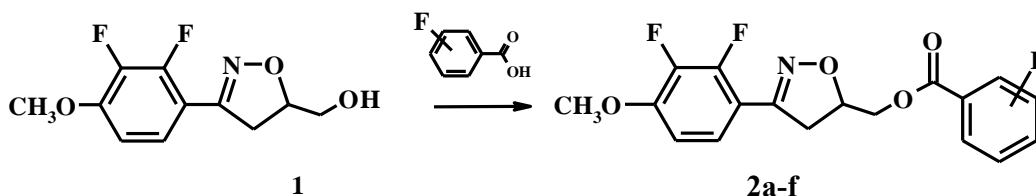
4. Соколовский А.Е., Баев А.К. // ЖОХ. 1993. Т. 63. Вып. 10. С. 2206-2209.
5. Соколовский А.Е., Баев А.К. // ЖОХ. 1997. Т. 67. Вып. 3. С. 370-372.
6. Smith W.L., Wartik T. // J. Inorg. Nucl. Chem., 1967. Vol. 29. p. 629.
7. Соколовский А.Е. // ЖОХ. 2018. Т.88. Вып. 8. С.1389-1391.
8. Соколовский А.Е., Баев А.К. // ЖОХ. 1994. Т. 64. Вып.7. С.1117-1119.

УДК 547.539.1, 615.012.1

В. Н. Ковганко, Н.Н. Ковганко, И.Н. Слабко, Д.С. Дорошук
(БГТУ, г. Минск, Беларусь)

СИНТЕЗ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЯДА 3-АРИЛ-2-ИЗОКСАЗОЛИНОВ

На протяжении последних десяти лет наша исследовательская группа проводит интенсивные исследования по синтезу и изучению свойств фторсодержащих гетероциклических соединений, которые обладают свойствами микобактерицидов. При этом нами было установлено, что неплохую активность проявляют фторсодержащие соединения ряда 3-арил-2-изоксазолинов. В частности нами синтезирован ряд фторбензоатов 3-фторарил-5-гидроксиметил-2-изоксазолинов **2a-f** [1].



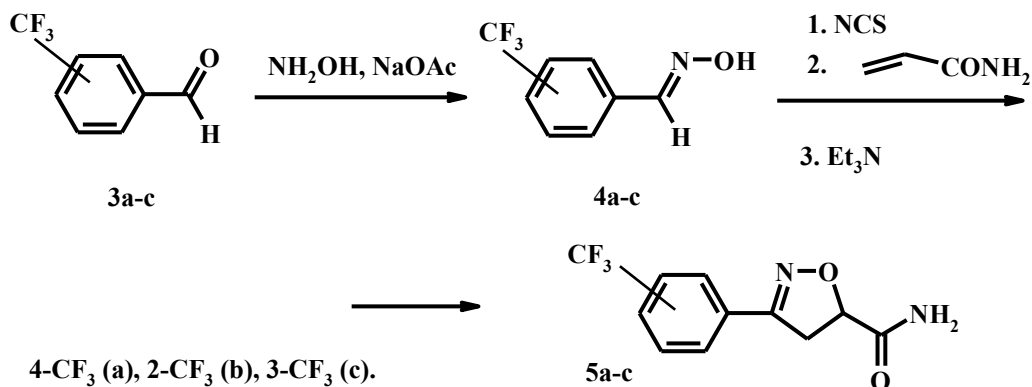
a Ar= 4-F-C₆H₄; b Ar= 3-F-C₆H₄; c Ar= 3,4-F,F-C₆H₃; d Ar= 3,5-F,F-C₆H₃;
e Ar= 4-OMe-3-F-C₆H₃; f 4-OMe-2,3-F,F-C₆H₂.

На ключевой стадии синтеза осуществляли этерификацию 2-изоксазолина **1** фторбензойными кислотами в присутствии дициклогексилкарбодиимида. Такое превращение привело к соответствующим сложным эфирам **2a-f**.

Исследование антимикобактериальных свойств полученных соединений проведено на штамме *Micobacterium terrae* 15755. Среди синтезированных соединений обнаружены вещества, активность которых выше, чем антимикобактериальная активность эталонных противотуберкулезных препаратов циклосерина, пипразинамида и изониазида.

Наиболее активным из синтезированных соединений оказался 3-фторбензоат **2b**. Установлено также, что на активность фторсодержащих эфиров **2** влияет количество атомов фтора в бензоатном фрагменте.

Также нами осуществлен синтез трифторметилзамещенных амидов 3-арил-2-изоксазолин-5-карбоновой кислоты **5a-c** [2]. На первой стадии, исходя из коммерчески доступных трифторметилзамещенных альдегидов **3a-c** реакцией с гидроксидом гидроксиламина в присутствии ацетата натрия, получили соответствующие оксимы **4a-c**.

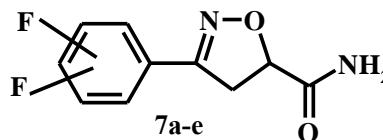
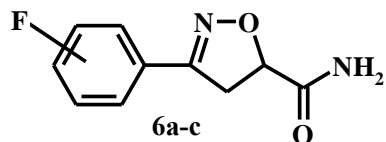


Дальнейшее хлорирование полученных оксимов **4a-c** с помощью *N*-хлорсукцинимидом и последующее дегидрохлорирование промежуточно образовавшегося хлорангида гидроксамовой кислоты под действием триэтиламина привело к генерированию нитрилоксида. Реакцией 1,3-диполярного циклоприсоединения указанного нитрилоксида к акриламиду получили целевые амиды 3-(трифторметилфенил)-2-изоксазолин-5-карбоновой кислоты **5a-c**.

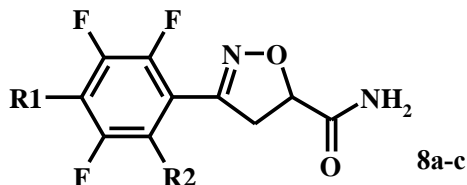
Исследование антимикобактериальных свойств полученных соединений показало, что активность амидов **5b,c** оказалась высокой и сравнима с активностью противотуберкулезных препаратов, используемых в настоящее время.

По аналогичной схеме синтеза нами также синтезированы моно-, ди- и полифторзамещенные амиды 3-арил-2-изоксазолин-5-карбоновой кислоты **6a-c**, **7a-e** и **8a-c**.

Исследование антимикобактериальных свойств полученных соединений показало, что активность амидов **6** и **7** сравнима с активностью противотуберкулезных препаратов. Активность нового синтезированного соединения – амида 3-(2,3,4,5-тетрафторфенил)-2-изоксазолин-5-карбоновой кислоты **8a** оказалась высокой и превосходила активность противотуберкулезных препаратов, используемых в настоящее время.

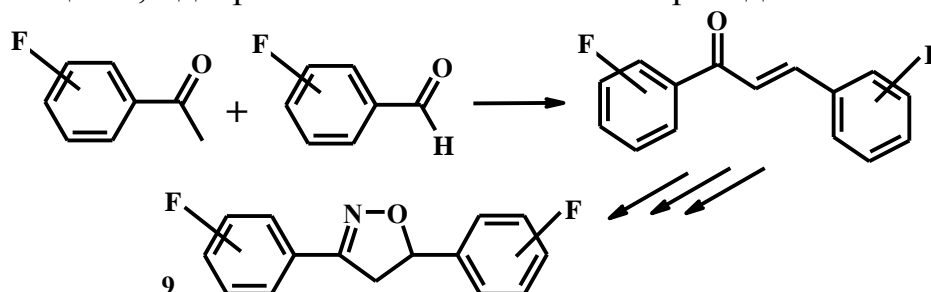


2-F (a), 3-F (b), 4-F (c). 3,4-FF (a), 2,6-FF (b), 3,5-FF (c), 2,4-FF (d), 2,5-FF (e).



$R_1 = F, R_2 = H$ (a), $R_1 = H, R_2 = F$ 2,3,5,6-FFFF (b), $R_1 = F, R_2 = F$ (c).

В настоящее время нами осуществляется работа по синтезу фторсодержащих 3,5-диарил-2-изоксазолинов **9** по приведенной схеме.



Предложенная схема синтеза включает конденсацию фторзамещенных ацетофенонов и бензальдегидов, дальнейшее превращение полученных халконов в оксимы и их внутримолекулярную циклизацию в целевые 2-изоксазолины.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н. Ковганко, Н.Н. Ковганко, И.Н. Слабко. Синтез новых 3-фторарил-2-изоксазолинов, обладающих антимикобактериальными свойствами. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2016. – № 2. – С. 55-58.

2. Н.Н. Ковганко, И.Н. Слабко, В.Н. Ковганко. Получение и антимикобактериальные свойства амидов 3-(трифторметилфенил)-2-изоксазолин-5-карбоновой кислоты. / БГМУ в авангарде медицинской науки и практики: рецензир. сб. науч. трудов. – 2019. – Вып. 9. – С. 380-383.

Научное издание

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
И ТЕХНИКА**

**Материалы докладов 85-ой научно-технической
конференции профессорско-преподавательского
состава, научных сотрудников и аспирантов
(с международным участием)**

Электронный ресурс

В авторской редакции

Компьютерная верстка:

*Н.А. Гвоздева, В.И. Козловский, О.А. Алисиенок,
Н.М. Олиферович, Е.Г. Сапон, Е.О. Черник*

Усл. печ. л. 18,25. Уч.-изд. л. 18,84

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распро-
странителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.