НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Главная редакция:

А.М. Данилов (главный редактор) Е.В. Королев (заместитель главного редактора) И.А. Гарькина (ответственный секретарь)

Адрес редакции:

440028, г.Пенза, ул.Германа Титова, 28, ПГУАС

Тел/факс 8412 929501 E-mail: regas@pguas.ru fmatem@pguas.ru www.rais.pguas.ru

Редакторы: М.А. Сухова Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.

Подписной индекс:

36946 в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации.

Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора.

Подписано к печати 30.11.2020. Формат 60х84 1/8. Уч.-изд.л. 21,0. Тираж 500 экз. Первый завод 100. Заказ № 88.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 4(45)/2020

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

И ИЗДЕЛИЯ5
Береговой В.А., Болдырев С.А., Лавров И.Ю. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ 5
Селяев В.П., Неяскин А.В., Маврушкина Т.Н., Кечуткина Е.Л. ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ МКУ-85 И СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА ХИДЕТАЛ-ГП-97 НА ОДНОРОДНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОЙ КОМПОЗИЦИИ
Мацеевич Т.А., Поддаева О.И., Гришина А.Н., Корольченко Д.А. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ «ЗДАНИЕ (СООРУЖЕНИЕ) – СТРОИТЕЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ – СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ». ОБЩАЯ И ЧАСТНЫЕ ЗАДАЧИ
Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Черкасов Д.В. МИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА НА ОСНОВЕ КАРБОНИЗОВАННОГО ДИАТОМИТА
Б удылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. СИНТЕЗ КОМПОЗИТОВ: ОБРАБОТКА ДАННЫХ
Тараканов О.В., Белякова Е.А. ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ И СОСТАВ ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ46
Логанина В.И., Мажитов Е.Б. СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОЛИСИЛИКАТНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ЗОЛЬ-СИЛИКАТНЫХ КРАСОК
Логанина В.И., Мажитов Е.Б. ВЫБОР НАПОЛНИТЕЛЯ В РЕЦЕПТУРЕ ЗОЛЬ-СИЛИКАТНЫХ КРАСОК

- © Авторы публикаций, 2020
- © Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2020
- © ПГУАС, 2020

Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Карташов А.А., Юрова В.С. СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАКЦИОННО- И РЕОЛОГИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ ПОРОШКОВ ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД	Варенцов В.К., Кузина В.В., Кошев А.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА В ПРОТОЧНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД116
Варенцов В.К., Кошев А.Н., Кузина В.В., Варенцова В.И. КОМПОЗИЦИОННЫЕ И НАНОКОМПО- ИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ	Еремкин А.И., Пономарева И.К., Петрова К.А., Багдасарян А.Г. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МИКРО- КЛИМАТА В ЗАЛЕ БОГОСЛУЖЕНИЯ СПАССКОГО КАФЕДРАЛЬНОГО СОБОРА Г. ПЕНЗЫ
Хвастунов В.Л., Хвастунов А.В., Махамбетова К.Н. РЕАКЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ КАУСТИФИКАЦИИ И БРУСИТИЗАЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЕЗОБЖИГОВЫХ	Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ
БЕСКЛИНКЕРНЫХ МИНЕРАЛЬНО- ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ	Мерщиев А.А., Шепс Р.А., Лобанов Д.В., Шашин А.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОТОКА ПРЯМОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, НАПРАВЛЕННОГО НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ
Селяев В.П., Селяев П.В., Безрукова Е.С., Кечуткина Е.Л. ИЗГИБ БАЛКИ ИЗ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА С ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ 96 Саденко Д.С., Гарькин И.Н. ПРИЧИНЫ ДЕФЕКТОВ	ПОВЕРХНОСТЬ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С КОРРОЗИЕЙ БЕТОНА	Моисеев А.С., Рябихин С.П., Архутич Д.П., Андреев С.Ю. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛЫХ МОБИЛЬНЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В КАЧЕСТВЕ ОБЪЕКТОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ
Перельгин Ю.П., Гришин Б.М., Салмин С.М. УДАЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ АММИАКА ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И СТОЧНЫХ ВОД110	ЭНЕРГЕТИКИ156 Указатель статей, опубликованных в 2020 г164

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS 5	Varentsov V.K., Koshev A.N., Kuzina V.V., Varentsova V.I.
Beregovoy V.A., Boldyrev S.A., Lavrov I.Yu.	COMPOSITE AND NANOCOMPOSITE MATERIALS BASED ON CARBON FIBER
DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE RESEARCH OF MECHANICAL	MATERIALS: MODELING AND EXPERIMENT73
PROPERTIES OF THIN-LAYER MATERIALS5	Khvastunov V.L., Khvastunov A.V., Makhambetova K.N.
Selyaev V.P., Neyaskin A.V., Mavrushkina T.N., Kechytkina E.L. DISPERSION ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CONTENT OF MINERAL FILLER MKU-85 AND SUPERPLASTIFIER HIDETAL-GP-9γ ON THE UNIFORMITY AND STRENGTH OF THE CEMENT COMPOSITION	REACTIONARY PROCESSES OF CAUSTIFICATION AND BRUSITIZATION IN THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF NON-FIRING CLINKERLESS MINERAL-SLAG BINDERS
Matseevich T.A., Poddaeva O.I., Grishina A.N., Korol'chenko D.A.	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS96
ANALYSIS OF THE SYSTEM «BUILDING (CONSTRUCTION) – BUILDING STRUCTURE – BUILDING MATERIAL». GENERAL AND PARTICULAR PROBLEMS ¹	Selyaev V.P., Selyaev P.V., Bezrukova E.S., Kechytkina E.L. BEAM BENDING OF PHYSICALLY NONLINEAR DEFORMABLE MATERIAL WITH FRACTAL STRUCTURE96
Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Emelianov A.I., Cherkasov D.V. MINERAL ADDITIVE BASED ON CARBONIZED DIATOMITE	Sadenko D.S., Garkin I.N. CAUSES OF DEFECTS IN PRODUCTION OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE STRUCTURES RELATED
Budylina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. SYNTHESIS OF COMPOSITES: DATA PROCESSING	TO CONCRETE CORROSION105
Tarakanov O.V., Belyakova E.A.	ENGINEERING SYSTEMS110
THE INFLUENCE OF INTEGRATED MINERAL ADDITIVES ON THE STRENGTH AND COMPOSITION OF CEMENT MATERIALS HYDRATION	Perelygin Yu.P., Grishin B.M., Salmin S.M. REMOVAL OF AMMONIA COMPOUNDS FROM AQUEOUS SOLUTIONS AND
Loganina V.I., Mazhitov E.B. COMPOSITION AND PROPERTIES OF POLISILICATE BINDER FOR SOL-SILICATE PAINTS	WASTE WATER
Loganina V.I., Mazhitov E.B. THE CHOICE OF A FILLER IN THE FORMULATION OF SOL-SILICATE PAINTS	MODELING OF MASS TRANSFER PROCESSES IN FLOWING THREE- DIMENSIONAL ELECTRODES OF WASTE WATER
Belyakova E.A., Moskvin R.N., Kartashov A.A., Yurova V.S. MODERN CONCRETE USING REACTIVE AND RHEOLOGICALLY ACTIVE ROCK POWDERS	Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Petrova K.A., Bagdasaryan A.G. QUALITY IMPROVEMENT OF MICROCLIMATE IN THE SPASSKY CATHEDRAL IN PENZA

Budylina E.A., Garkina I.A.,	Andreev S.Yu., Lebedinskiy K.V., Knyazev V.A.
Danilov A.M.	NEW METHOD FOR CALCULATING THE
SOME ASPECTS OF COMPLEX	PROCESSES OF MASS TRANSFER OF AIR
CONTROLLED SYSTEMS SIMULATION 131	OXYGEN IN PNEUMATIC AERATION
Merschiev A.A., Sheps R.A.,	SYSTEMS 144
Lobanov D.V., Shashin A.V.	Moiseev A.S., Ryabikhin S.P.,
DETERMINATION OF THE AMOUNT OF	Arkhutich D.P., Andreev S.Yu.
DIRECT SOLAR RADIATION FLUX	USE OF SMALL MOBILE HYDRO POWER
DIRECTED AT HORIZONTAL	PLANTS AS RENEWABLE ENERGY
SURFACE	FACILITIES156

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 666.6:681.625.9

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Береговой Виталий Александрович,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии строительных материалов и деревообработки» E-mail: vabereg@rambler.ru

Болдырев Сергей Александрович,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции» E-mail: rector@pguas.ru

Лавров Иван Юрьевич,

магистрант

E-mail: techbeton@pguas.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department «Technology of Building Materials and Wood Processing»

E-mail: vabereg@rambler.ru

Boldyrev Sergey Aleksandrovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Building structures»

E-mail: rector@pguas.ru

Lavrov Ivan Yurievich

Undergraduate

E-mail: techbeton@pguas.ru

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.А. Береговой, С.А. Болдырев, И.Ю. Лавров

Разработана рабочая модель испытательной установки, предназначенной для работы с рулонными строительными материалами. Подробно описаны ее основные узлы и компоновочная схема. Приведены результаты экспериментов по использованию спроектированной установки при оценке прочностных и адгезионных показателей материалов. На примере многослойных рулонных материалов доказана высокая прецизионность работы.

Ключевые слова: цифровые технологии, конструирование, испытательное оборудование, свойства, рулонные материалы

DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF THIN-LAYER MATERIALS

V.A. Beregovoy, S.A. Boldyrev, I.Yu. Lavrov

A test model of a setup designed to work with roll building materials has been designed. Its main units and layout are described in detail. The results of experiments of the designed installation in assessing the strength and adhesive properties of materials are presented. On the example of multilayer roll materials, the high precision of the obtained data has been proven.

Keywords: digital technology, design, test equipment, properties, roll materials

Введение. Развитие цифровых технологий позволяет существенно упростить и удешевить процесс создания прецизионного лабораторного оборудования для решения узкоспециализированных задач. Этому способствует наличие доступной компонентной базы для конструирования таких устройств, включая материнские платы, тензодатчики разнообразного назначения, драйверы, микроконтроллеры, шаговые двигатели и т.п. В настоящей работе рассматривается метод исследования силы сцепления (адгезии), а также предела прочности рулонных материалов.

Методы и материалы. В строительные лаборатории часто обращаются заинтересованные организации для решения нестандартных задач, связанных с проведением механических испытаний рулонных и тонкопленочных материалов с толщиной рабочего слоя 0,5...2,5 мм. Зачастую такие задачи усложняются минимальным количеством образцов материала, что вызывает необходимость выполнения испытаний с повышенной точностью (до 0,1 H), обеспечивающей минимизацию вариации получаемых данных. Типовое оборудование лаборатории не всегда удовлетворяет указанным требованиям, исходя из незначительных величин разрушающих нагрузок.

Для решения поставленной задачи были расширены технические возможности универсального 3D-принтера, разработанного ранее [1, 2]. Этому способствовала портальная схема несущей конструкции данного устройства, обеспечивающая восприятие нагрузок, возникающих при испытании рулонных материалов на растяжение и адгезию. Ограничение максимального усилия в процессе испытаний было установлено на уровне 200 Н.

Принципиальная кинематическая схема многофункционального устройства (МФУ), скомпонованная под испытание пленочных материалов, приведена на рис. 1.

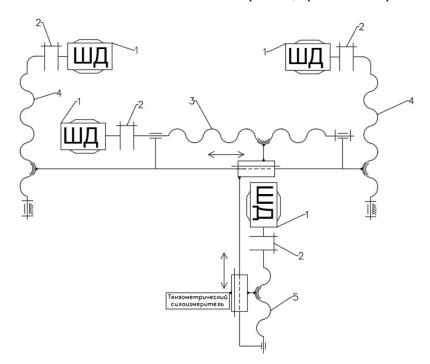


Рис. 1. Кинематическая схема МФУ:

1 — шаговые двигатели 17HS4401; 2 — муфты упругие; 3 — ходовой винт оси «Х»; 4 — ходовые винты оси «Y»; 5 — ходовой винт оси «Z»

Реализованный подход основан на использовании тензометрического силоизмерителя, установленного на рабочую платформу подвижной каретки. Перемещение датчика с прикрепленным зажимом осуществляется шаговым приводом оси Z (рис. 2).

Устройство узлов крепления тензометрического датчика и компоновочная схема рабочего органа испытательной установки показаны на рис. 3.

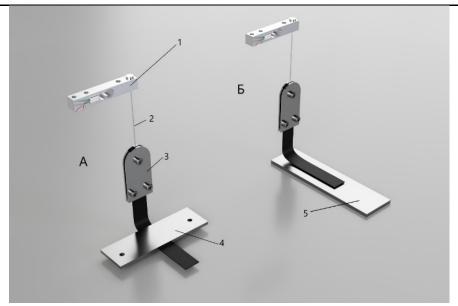


Рис. 2. Конфигурация элементов для измерения: А – прочности при растяжении; Б – адгезии: 1 – тензометрический датчик; 2 – тяга; 3 – подвижный зажим; 4 – неподвижный зажим; 5 – пластина для измерения силы сцепления

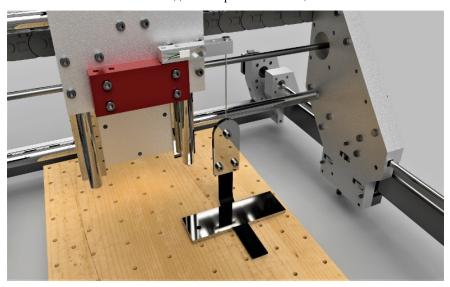


Рис. 3. Общий вид МФУ с узлом крепления датчика силоизмерителя

Процесс измерения нагрузок, возникающих при нагружении испытываемого материала, заключается в следующем. Аналоговый сигнал с тензометрического силоизмерителя поступает на вход аналого-цифрового преобразователя НХ-711, где преобразуется в цифровой, который, в свою очередь, регистрируется микроконтроллером Arduino nano. В микроконтроллере сигнал пересчитывается в значение нагрузки и последовательно передается на подключенный компьютер по интерфейсу USB. Результат измерения представляет собой построчно записанные значения нагрузки. Преимуществом данной системы является высокая чувствительность прибора при регистрации кривой нагружения пленочного материала на различные виды испытаний. Это позволяет фиксировать экстремальные точки функции изменения силы и оценивать характер разрушения материала.

Управление перемещением верхнего подвижного зажима происходит штатным микроконтроллером МФУ. Технические характеристики испытательной установки приведены в таблице.

Технические характеристики установки

Показатель	Значение
Максимальная скорость перемещения верхнего зажима	3000 мм/мин
Минимальная скорость перемещения верхнего зажима	10 мм/мин
Максимальный ход каретки с датчиком	120 мм
Максимальная частота снятия показаний с датчика	500 Гц
Максимальная допустимая нагрузка	20 000 гс
Цена деления измерительного датчика (3020000 гс)	0,012 гс

При проведении работ по отладке оборудования и оценке корректности его функционирования для рассматриваемого круга задач в качестве контрольных были приняты образцы самоклеящихся рулонных материалов, предназначенных для использования в конструкциях защитных покрытий при изоляции наружной поверхности подземных нефтегазопроводов и нефтепродуктопроводов: лента полимерно-битумная «Литкор» (материал №1) и лента полиэтиленовая «Полилен» (материал №2).

Экспериментальные кривые в координатах «нагрузка – деформация», полученные при испытаниях материала №1, приведены на рис. 4.

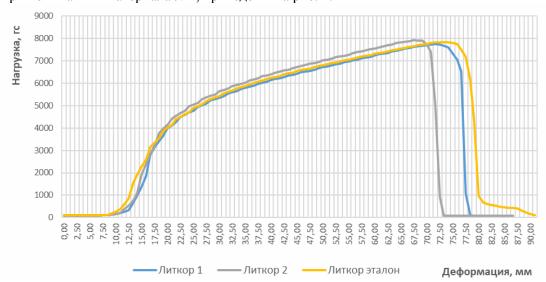


Рис. 4. Диаграмма нагружения полимерно-битумного материала

Анализ данных на рис. 4 указывает на идентичность характера поведения анализируемых материалов под нагрузкой.

На рис. 5 показан процесс испытания материала №1 с целью оценки показателя адгезии к полимерной подложке.





Рис. 5. Лента полимерно-битумная (материал №1): оценка величины адгезии

Как следует из рис. 5, разрушение в зоне контакта имеет когезионно-адгезионный характер [3, 4]. Кривые «нагрузка – деформация», снятые в зоне отрыва от подложки, приведены на рис. 6.

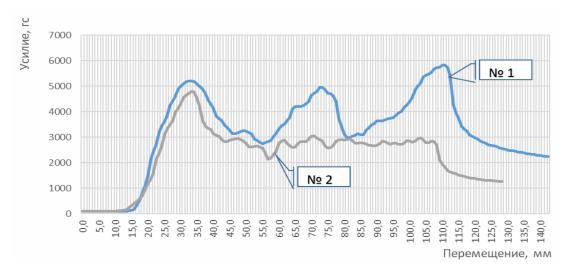


Рис. 6. Материал №1: диаграмма нагружения при отрыве от подложки

Кривые на рис. 6 существенно различаются по пиковым значениям усилий отрыва от подложки. Для получения корректного результата обработку полученных данных производили в соответствии с требованиями ГОСТ 411-77 и ГОСТ 11262-2017 по пяти максимальным и пяти минимальным показаниям силы, исключая первый.

При оценке величины адгезии к подложке контрольные образцы материала изготавливали в форме полосок шириной 20 мм. На рис. 7 показаны кривые, характеризующие работу материала №2 при испытании на разрыв.

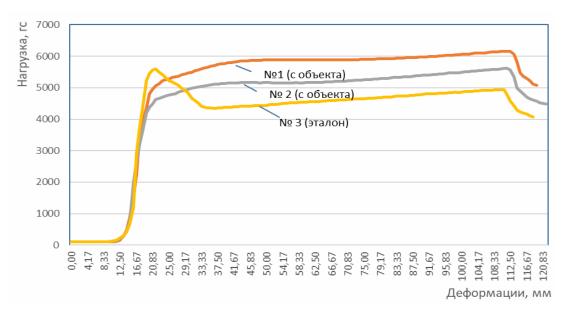


Рис. 7. Материал №2: диаграмма нагружения при испытании на разрыв

Результаты испытаний на определение величины нагрузок и деформаций в месте отрыва от подложки для рулонного материала «Полилен» показаны на рис. 8.

Данные на рис. 8 указывают на существенные отклонения в значениях пиковых нагрузок при испытании на отрыв от подложки для полосок материала, вырезанных из одного рулона. Это свидетельствует о неоднородности структуры анализируемого материала [5, 6].

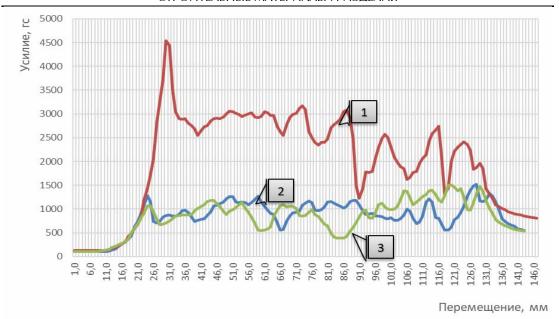


Рис. 8. Материал №2: диаграмма нагружения при отрыве от подложки

В ходе проведенных испытаний подтверждена пригодность разработанной системы для эффективной оценки механических показателей материалов, характеризующихся малой величиной поперечного сечения контрольных образцов. В настоящее время на базе технических решений, апробированных в ходе выполнения исследований, ведется работа по созданию многоцелевой испытательной машины для оценки показателей свойств пленочных материалов и сырьевых структурированных смесей (рис. 9).

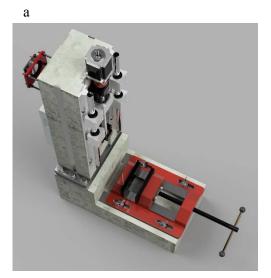




Рис. 9. Многоцелевая испытательная машина: а – вид сверху; б – вид сбоку

Выводы. Результаты опытов с применением полимерных и битумных рулонных материалов показали перспективность применения цифровых технологий в конструкции устройств, предназначенных для решения задач проведения прецизионных механических испытаний тонкопленочных материалов.

Преимуществами системы линейного перемещения захватов на основе шагового привода, примененной в конструкции разработанной установки, являются высокая точность и постоянство скорости рабочего хода.

К выявленным недостаткам следует отнести дискретность движения, возникающую из-за специфики работы шагового двигателя. Как показали опыты, указанный недостаток проявляется лишь на низких скоростях перемещения и может быть частично устранен путем увеличения дробления шага драйвером.

Список литературы

- 1. Береговой, В.А. 3D-принтер для печати строительной керамики / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 1. С. 32–37.
- 2. Береговой, В.А. 3D-принтер для печати строительной керамики с опцией фрезерования изделий / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, А.А. Горохова, Д.А. Дубинин // Строительство: новые технологии новое оборудование. 2020. № 6. С. 34–45.
- 3. Ратнер, С.Б. Физическая механика пластмасс / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. М.: Химия, 1992. 390 с.
- 4. Логанина, В.И. Разработка рецептуры золь-силикатной краски / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. 2017.— №3. С.51—53.
- 5. Гарькина, И.А. Строительные материалы как системы / И.А Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. 2006. № 7. С. 55–58.
- 6. Бормотов, А.Н. Методика представления композиционного материала как объекта исследования и моделирования / А.Н. Бормотов, Е.А.Колобова, Ю.В. Конопацкий // Региональная архитектура и строительство. − 2012. − № 14. − С.44–52.

References

- 1. Beregovoy, V.A. 3D-printer for printing building ceramics / V.A. Beregovoy, I. Yu. Lavrov // Regional architecture and engineering. 2020. No 1. P. 32–37.
- 2. Beregovoy, V.A. 3D-printer for printing building ceramics with the option of milling products / V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov, A.A. Gorokhova, D.A. Dubinin //Construction: new technologies new equipment. 2020. No 6. P. 34–45.
- 3. Ratner, S.B. Physical mechanics of plastics / S.B. Ratner, V.P. Yartsev. M.: Chemistry, 1992. 390 p.
- 4. Loganina, V.I. Development of the formulation of a sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov //Regional architecture and engineering. 2017.– No 3. P.51–53.
- 5. Garkina, I.A. Building materials as systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. 2006. No. 7. P. 55–58.
- 6. Bormotov, A.N. Methods of presenting a composite material as an object of research and modeling / A.N. Bormotov, E.A. Kolobova, Yu.V. Konopatsky // Regional architecture and engineering. 2012. No. 14. P.44–52.

УДК 666.94.017:53

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева

Россия, 430006, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68,

тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

Селяев Владимир Павлович,

доктор технических наук, профессор,

академик PAACH E-mail: ntorm80@mail.ru

Неяскин Александр Васильевич,

магистрант кафедры «Строительные конструкции»

E-mail: neyaskin1997@mail.ru

Маврушкина Татьяна Николаевна,

магистрант кафедры «Строительные конструкции»

E-mail: mavrushkina-tanyshka@mail.ru

Кечуткина Евгения Львовна,

инженер кафедры «Строительные конструкции»

E-mail: kechytkina85@mail.ru

Mordovian National Research State University named after N.P. Ogarev

Russia, 430006, Saransk, 68, Bolshevistskaya St.,

tel.: +7(8342)47-71-56; fax: +7(8342)47-71-56

Selyaev Vladimir Pavlovich,

Doctor of Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences E-mail: ntorm80@mail.ru

Neyaskin Alexander Vasilievich,

Undergraduate of the department «Building structures»

E-mail: neyaskin1997@mail.ru

Mavrushkina Tatiana Nikolaevna.

Undergraduate of the department «Building structures»

E-mail: mavrushkina-tanyshka@mail.ru

Kechutkina Evgeniya Lvovna,

Engineer of the department «Building structures»

E-mail: kechytkina85@mail.ru

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ МКУ-85

И СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА ХИДЕТАЛ-ГП-97 НА ОДНОРОДНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОЙ КОМПОЗИЦИИ

В.П. Селяев, А.В. Неяскин, Т.Н. Маврушкина, Е.Л. Кечуткина

Методом дисперсионного и регрессионного анализа технологического процесса изготовления цементных композиций установлено влияние микрокремнезема, пластификатора Хидетал и магнитных излучений на однородность и прочность при сжатии образцов. Было выявлено, что для повышения прочности и однородности цементной композиции необходимо ограничить содержание пластификатора Хидетал до 0.5 % от массы цемента и время воздействия электромагнитных излучений до 2 часов, а уровень содержания микрокремнезема в цементной композиции от 0 до 20 % практически не влияет на изменение прочности материала.

Ключевые слова: композиция, цемент, наполнитель, пластификатор, дисперсионный анализ, прочность, однородность

DISPERSION ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CONTENT OF MINERAL FILLER MKU-85 AND SUPERPLASTIFIER HIDETAL-GP-9γ ON THE UNIFORMITY AND STRENGTH OF THE CEMENT COMPOSITION

V.P. Selyaev, A.V. Neyaskin, T.N. Mavrushkina, E.L. Kechytkina

Using the method of dispersion and regression analysis of the technological process of manufacturing cement compositions, the effect of microsilica, Hidetal plasticizer and magnetic

radiation on the homogeneity and compressive strength of the samples was established. It was found that to increase the strength and homogeneity of the cement composition, it is necessary to limit the content of Hidetal plasticizer to 0.5 % of the cement mass and the time of exposure to electromagnetic radiation to 2 hours, but the level of the microsilica content from 0 to 20 % of the cement mass has almost no effect.

Keywords: composition, cement, filler, plasticizer, dispersion analysis, strength uniformity

Наполненные цементные композиции получили широкое распространение в практике производства железобетонных изделий с повышенной прочностью, плотностью, улучшенными эксплуатационными характеристиками [1–4].

В качестве наполнителей часто применяют микрокремнезем в виде тонкозернистых дисперсных порошков [5, 6]. При высокой степени наполнения цементных композитов рекомендовано в состав вяжущего вводить суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров типа Sika ViscoCrete, которые дают возможность повысить однородность смесей, улучшить технологические и физические свойства композитов [7]. В последние годы разработан российский аналог суперпластификаторов поликарбоксилатного типа Хидетал-ГП-9 у. В научной литературе нет единого мнения о влиянии дозировки и соотношения вводимых минеральных наполнителей и пластификаторов на однородность, прочность цементных вяжущих. Поэтому поставлена задача изучить влияние суперпластификатора Хидетал и микрокремнезема, а также их соотношения на однородность цементных композиций. Однородность композита оценивалась методом дисперсионного анализа результатов измерения прочности на сжатие. Для этого изготавливались образцы в виде: призм размером $20 \times 20 \times 70$ мм; цилиндров - 47×190 мм; кубов - 100×100×100 мм. Испытания образцов на сжатие производилось после 28 суток твердения при температуре 20 °C и влажности воздуха более 80 %.

Для оценки влияния пластификатора и минерального наполнителя использовали метод дисперсионного анализа, сущность которого заключается в разложении суммарной дисперсии на две составляющие: дисперсию, обусловленную техникой эксперимента S_R^2 , и дисперсию, связанную с действием изучаемого фактора S_A^2 . При этом производится сравнение оценки S_A^2 дисперсии, вызванной изучаемым фактором A, и оценки S_R^2 остаточной дисперсии, наблюдающейся уже после того, как влияние фактора A было установлено [8].

Для проведения однофакторного дисперсионного анализа результаты испытаний сводим в таблицы вида 1 и 2. По результатам испытаний для оценки дисперсий S_R^2 и S_A^2 вычисляем суммы квадратов отклонений, вызванных изучаемыми факторами SS_A и ошибкой эксперимента SS_R , по формулам:

$$SS_R = \sum_{i=1}^h \sum_{l=1}^{m_i} \left(x_{il} - \frac{\sum_{l=1}^{m_i} x_{il}}{m_i} \right)^2,$$

$$SS_{A} = \sum_{i=1}^{h} m_{i} \left(\frac{\sum_{i=1}^{m_{i}} x_{il}}{m_{i}} - \frac{\sum_{l=1}^{m_{i}} \sum_{i=1}^{h} x_{il}}{m_{i}h} \right)^{2}.$$

Рассмотрим отклонения прочности при сжатии от среднего значения при различном содержании пластификатора Хидетал- $\Gamma\Pi$ -9 γ .

Результаты измерения прочности на сжатие ЦК
при различном содержании пластификатора

Уровни содержания	Резул	ътаты (σ, l	опреде. МПа	ления	Сумма	Число наблю- дений	Среднеариф- метическое значение
Хидетал-ГП-9 γ, % от цемента	1	2	3	4	$\sum_{l=1}^{m} x_{il}$	m_{i}	$\overline{\sigma_{_i}}$
0,5	62,47	49,24	52,51	47,28	211,5	4	52,88
0,667	62,61	55,6	49,56	54,79	222,56	4	55,64
0,883	48,73	54,09	57,05	48,59	208,46	4	52,12
1,000	54,68	40,59	39,78	42,83	177,8	4	44,47

$$SS_R = 419,10;$$
 $SS_A = 1098,4;$ $S_A^2 = \frac{SS_A}{h-1} = \frac{1098,4}{3} = 336,13;$ $S_R^2 = \frac{SS_R}{N-h} = \frac{419}{12} = 34,92;$ $F_{\text{pac}^{\text{q}}} = \frac{S_A^2}{S_R^2} = \frac{366,13}{34,92} = 10,4,$

где N — общее число наблюдений; m_i — число наблюдений на i-м уровне фактора; 12—1 и N — h — число степеней свободы h — 1 = h_1 = 3; N — h = h_2 = 12.

Определяем для 95 % уровня значимости при h_1 = 3 и h_2 = 12 табличное значение критерия Фишера – $F_{\text{табл}}$ = 3.49.

Поскольку $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$, то фактор A (уровень содержания пластификатора) признается значимым, т.е. однородность, а следовательно и прочность при сжатии, плотность цементной композиции зависят от уровня содержания пластификатора в цементной композиции.

Рассмотрим изменчивость экспериментальных данных при различном содержании минерального наполнителя (см. табл. 2).

Таблица 2 Результаты измерения прочности на сжатие ЦК при различном содержании микрокремнезема МКУ-85

Уровни содержания			іределеі Па	ния σ,	Сумма	Число наблюдений	Среднее арифметическое значение
МКУ-85, % от цемента	1	2	3	4	$\sum_{l=1}^{m} x_{il}$	m_{i}	$\overline{\sigma}_i$
0	62,47	49,24	52,51	47,28	211,5	4	52,88
10	64,86	63,17	53,83	47,50	229,36	4	57,34
15	68,59	68,05	59,33	51,81	247,78	4	61,95
20	66,16	60,87	49,56	53,50	230,09	4	57,52

$$SS_R = 692,76; \quad SS_B = 615,32; \quad SS_R^2 = \frac{692,76}{12} = 57,73; \quad SS_B^2 = \frac{615,32}{3} = 205,1;$$

$$F_{\text{pac4}} = \frac{S_B^2}{S_R^2} = \frac{205,1}{57,73} = 3,55; \quad F_{\text{pac4}} = 3,55 > F_{\text{табл}} = 3,49.$$

Так как критерий $F_{\text{расч}}$ почти равен $F_{\text{табл}}$, то фактор B (уровень содержания МКУ-85 до 20 % от цемента) незначительно влияет на однородность цементной композиции при содержании пластификатора Хидетал-ГП-9 γ 0,5 % от массы цемента.

Для исследования влияния условий твердения и количественного соотношения пластификатора и наполнителя на прочность цементной композиции при сжатии был применен регрессионный анализ экспериментальных данных.

В табл. 3 приведены результаты трехфакторного эксперимента, при проведении которого варьировались значения переменных: X_1 – содержание МКУ-85, % от цемента; X_2 – содержание Хидетал-ГП-9 γ , % от цемента; X_3 – время твердения в условиях действия электромагнитного излучения в ЭМ-камере, ч. В результате регрессионного анализа определены коэффициенты полиномиального уравнения вида:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

 $\begin{tabular}{ll} T a б л и ц а 3 \\ Πлан трехфакторного экспериментального исследования \\ co значениями варьируемых факторов

		Ma	триі	ца пл	аниј	рова	ния				G	-
№ опыта	\mathcal{X}_0	x_1	x_2	\mathcal{X}_3	x_1x_2	$x_1.x_3$	$x_2.x_3$	$x_1.x_2.x_3$	Y	Содержание МКУ-85, % от цемента	Содержание Хидетал- ГП-9ү, % от цемента	Время твер- дения в ЭМ-камере, ч
1	+	-	-	-	+	+	+	-	62,47	0	0,5	0
2	+	+	-	-	-	-	+	+	66,16	20	0,5	0
3	+	-	+	-	1	+	1	+	54,68	0	1	0
4	+	+	+	-	+	-	-	-	48,99	20	1	0
5	+	-	ı	+	+	ı	-	+	47,28	0	0,5	6
6	+	+	ı	+	ı	+	-	ı	53,5	20	0,5	6
7	+	-	+	+	-	-	+		42,83	0	1	6
8	+	+	+	+	+	+	+	+	50,45	20	1	6

В матричной форме систему нормальных уравнений для определения оценок неизвестных коэффициентов по результатам проведенных опытов можно записать в следующем виде:

$$[X]*[B] = [Y],$$

где [X] – матрица условий эксперимента; [B] – матрица неизвестных коэффициентов; [Y] – матрица результатов опытов.

Оценки коэффициентов были найдены на основании следующих матричных преобразований:

$$([X]*[X])*[B] = [X]*[Y]; [B] = ([X]*[X])^{-1}[X]*[Y]$$

Из произведения матриц $(([X]^*[X])^{-1}*[X^*])^*[Y] = [B]$ следует, что коэффициенты значимости регрессии равны:

Таблица 4

Вектор-столбец [В						
	[B]					
b0	53,295					
b1	1,48					
b2	-4,0575					
b3	-4,78					
b12	-0,9975					
b13	1,98					
b23	2,1825					
b123	1,3475					

В результате определения числовых значений коэффициентов полиномиальное уравнение принимает вид:

$$\sigma = 53,295+1,48 \cdot x_1 - 4,0575 \cdot x_2 - 4,78 \cdot x_3 - 0,9975 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,98 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2,1825 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,3475 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

С помощью полученного уравнения регрессии строим графики зависимости прочности от параметров X_1, X_2, X_3 .

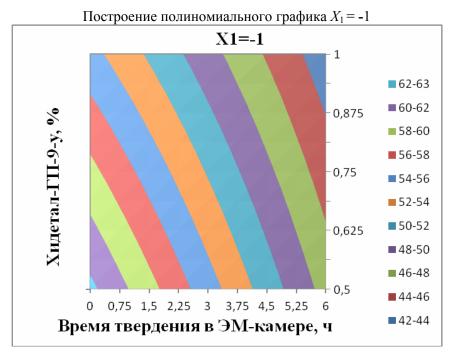


Рис. 1. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения Хидетал-ГП-9 γ и времени твердения в ЭМ-камере

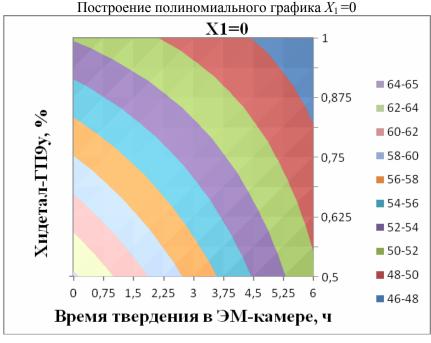


Рис. 2. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения Хидетал-ГП-9 γ и времени твердения в ЭМ-камере

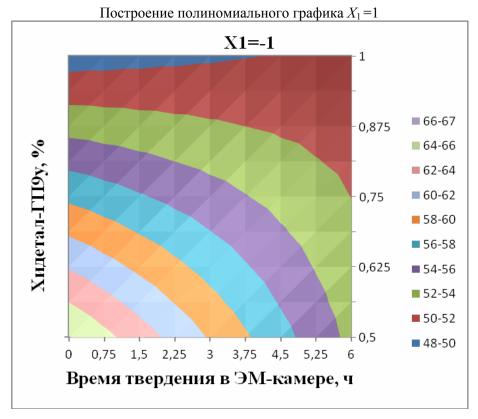


Рис. 3. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения Хидетал-ГП-9 γ и времени твердения в ЭМ-камере

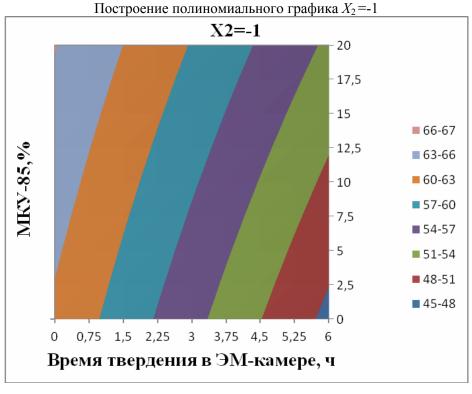


Рис. 4. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения МКУ-85 и времени твердения в ЭМ-камере

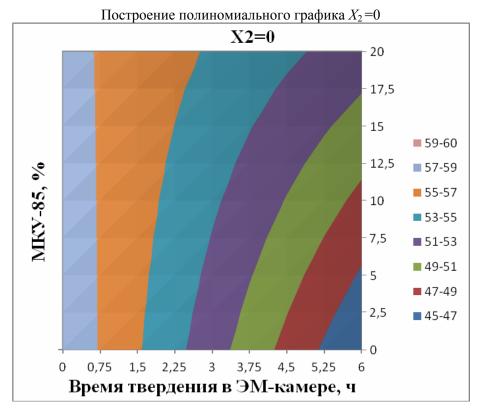


Рис. 5. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения МКУ-85 и времени твердения в ЭМ-камере

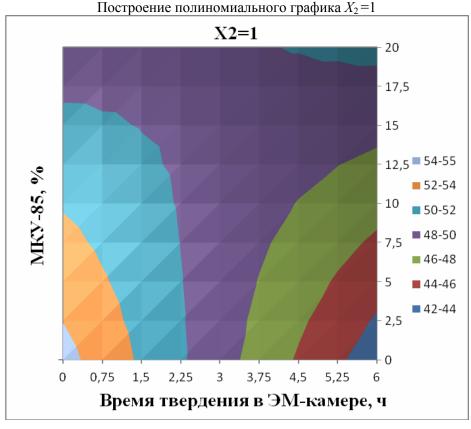


Рис. 6. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения МКУ-85 и времени твердения в ЭМ-камере

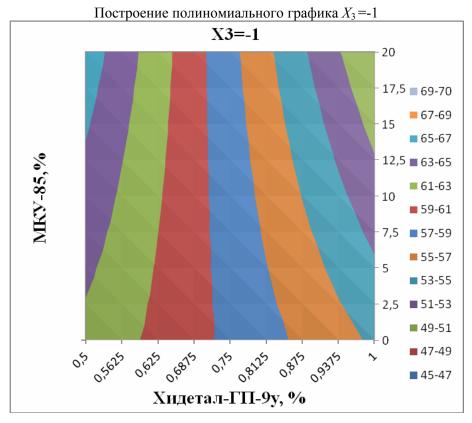


Рис. 7. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения МКУ-85 и Хидетал-ГП-9 γ

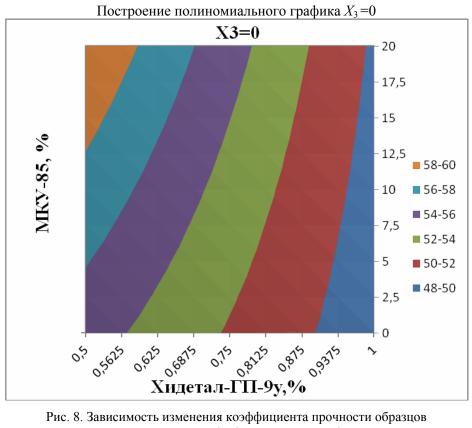


Рис. 8. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения МКУ-85 и Хидетал-ГП-9 γ

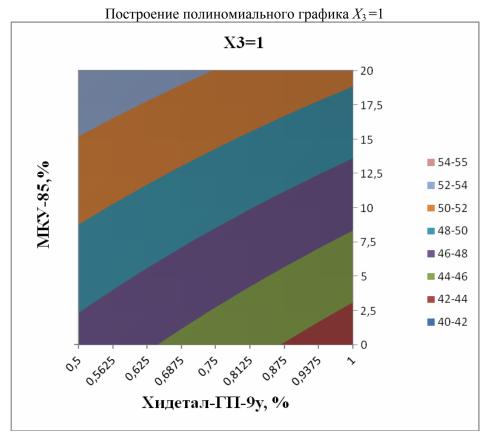


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента прочности образцов от отношения МКУ-85 и Хидетал-ГП-9 γ

Из анализа экспериментальных данных получены графические зависимости прочности от параметров X_1, X_2, X_3 , которые позволяют сделать следующие выводы:

- 1. Повышение содержания микрокремнезема от 0 до 20 % от массы цемента почти не влияет на прочность и однородность цементной композиции.
- 2. Для повышения прочности и однородности цементной композиции следует ограничить содержание пластификатора Хидетал до 0.5 % от массы цемента.
- 3. Для повышения прочности и однородности цементной композиции необходимо ограничить длительность действия электромагнитных излучений (не более 2 часов).

Список литературы

- 1. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. М.: ACB, 2007. 528 с.
- 2. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. М.: Стройиздат, 1987. 264 с.
- 3. Селяев, В.П. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов / В.П. Селяев, В.И. Соломатов, Л.М. Ошкина. Саранск: изд-во Мордов. ун-та, 2001. 152 с.
- 4. Пустовгар, А.П. Эффективность применения активированного диатомита в сухих строительных смесях / А.П. Пустовгар // Строительные материалы. -2006. -№10. -C. 62–64.
- 5. Каприелов, С.С. Микрокремнезем: классификация; основные факторы механизма действия; влияние на структуру и свойства цементного камня / С.С. Каприелов // Химические добавки и их применение в технологии производства сборного железобетона. М.: Центральный российский Дом знаний, 1992. С. 62–68.

- 6. Каприелов, С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.Р. Кривобородов // Бетон и железобетон. − 1992. − №7. − С. 4–7.
- 7. Калашников, В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. 2008. №10. С. 4–6.
- 8. Данилов, А.М. Планирование эксперимента. Обработка опытных данных / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, А.П. Прошин; под ред. д-ра технических наук, проф. А.М. Данилова. Пенза: ПГУАС, 2005. 284 с.

References

- 1. Bazhenov, Y.M. Concrete technology / Y.M. Bazhenov. M.: ASV, 2007. 528 p.
- 2. Solomatov, V.I. Chemical resistance of composite building materials / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev. M.: Stroyizdat, 1987. 264 p.
- 3. Selyaev, V.P. Chemical resistance of filled cement composites / V.P. Selyaev, V.I. Solomatov, L.M. Oshkina. Saransk: Publishing House Mordovia University, 2001. 152 p.
- 4. Pustovgar, A.P. Efficiency of using activated diatomite in dry building mixtures / A.P. Pustovgar // Building materials. − 2006. − №10. − P. 62–64.
- 5. Kaprielov, S.S. Silica fume: classification; the main factors of the mechanism of action; Influence on the structure and properties of the cement stone / S.S. Kaprielov // Chemical additives and their application in precast concrete production technology. M.: Central Russian House of Knowledge, 1992. P. 62–68.
- 6. Kaprielov, S.S. Influence of the structure of a cement stone with microsilica and superplasticizer additives on concrete properties / S.S. Kaprielov, A.V. Sheinfeld, Y.R. Krivoborodov // Concrete and reinforced concrete. − 1992. − №7. − P. 4–7.
- 7. Kalashnikov, V.I. Calculation of compositions of high-strength self-compacting concrete / V.I. Kalashnikov // Building materials. 2008. №10. P. 4–6.
- 8. Danilov, A.M. Experiment planning. Experimental data processing / I.A. Garkina, A.M. Danilov, A.P. Proshin. Edited by Doctor of Sciences, prof. A.M. Danilov. Penza: PGUAS, 2005. 284 p.

УДК 691:533.682:69.059.4

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

Мацеевич Татьяна Анатольевна,

доктор физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Прикладная математика»

E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

Поддаева Ольга Игоревна,

кандидат технических наук, доцент, зав. учебно-научно-производственной лабораторией по аэродинамическим испытаниям строительных конструкций E-mail: poddaeva@mgsu.ru

Гришина Анна Николаевна,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник НОЦ НТ, доцент кафедры «Строительные материалы и материаловедение» E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

Корольченко Амитрий Александрович,

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Комплексная безопасность в строительстве»

E-mail: ICA_kbs@mgsu.ru

Moscow National Research State University of Civil Engineering

Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoe shosse

Matseevich Tatyana Anatolyevna,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head the department «Applied Mathematics» E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

Poddaeva Olga Igorevna,

Candidate of Sciences, Associate Professor, Head of educational research and production laboratory for aerodynamic testing of building structures

E-mail: poddaeva@mgsu.ru

Grishina Anna Nikolaevna,

Candidate of Sciences, senior research officer with Scientific and Educational Center «Nanomaterials and Nanotechnologies», Associate Professor of the department «Building Materials and Materials Science» E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

Korolchenko Dmitry Alexandrovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor, Head of the department «Integrated Safety in Construction»

E-mail: ICA kbs@mgsu.ru

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ «ЗДАНИЕ (СООРУЖЕНИЕ) – СТРОИТЕЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ – СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ». ОБЩАЯ И ЧАСТНЫЕ ЗАДАЧИ¹

Т.А. Мацеевич, О.И. Поддаева, А.Н. Гришина, Д.А. Корольченко

Представлены общая и частная задачи оптимизации сложной иерархической технической системы «здание (сооружение) — строительная конструкция — строительный материал». На примере проектирования мостовых сооружений показаны сложности при оптимизации таких систем и причины, приводящие к авариям в процессе эксплуатации указанных сооружений. Во взаимодополняющий комплекс частных задач, ошибки при решении которых также являются источником аварий мостовых сооружений, выделены задачи, связанные как с получением конструкционных материалов с регулируемым структурообразованием в эксплуатационный период, так и проведением физических экспериментов на динамически подобных моделях мостовых сооружений для определения уровня демпфирования реальной конструкции, оценки устойчивости конструкций, созданных из различных материалов.

Ключевые слова: системный анализ, структурообразование, долговечность, мостовые сооружения, аэродинамика, демпфирование, устойчивость, строительные материалы

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект «Теоретикоэкспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» # FSWG-2020-0007).

ANALYSIS OF THE SYSTEM «BUILDING (CONSTRUCTION) – BUILDING STRUCTURE – BUILDING MATERIAL». GENERAL AND PARTICULAR PROBLEMS¹

T.A. Matseevich, O.I. Poddaeva, A.N. Grishina, D.A. Korol'chenko

The article deals with the general and particular problems of optimization of a complex hierarchical technical system «Building (construction) – building structure – building material». The problems, which solutions lead to errors that may cause bridge structures failing are organized into a complex of self-complementing particular problems. These problems are associated both with production of structural materials with controlled structure formation during the operational period, and with conducting physical experiments on dynamically similar models of bridge structures in order to determine the level of damping of a real structure and to assess the stability of structures made from various materials.

Keywords: systems analysis, structure formation, durability, bridge structures, aerodynamics, damping, stability, building materials

Оптимизация технической системы «здание (сооружение) — строительная конструкция — строительный материал» является традиционной инженерной деятельностью для строительства. Неполный учет факторов внешней среды и/или внутренних связей часто приводит к авариям и катастрофам различного масштаба [1]. В работе [2] представлена классификация причин, приводящих к авариям и катастрофам:

- воздействие стихийных природных явлений (наводнения, землетрясения, ураганы и др.);
- низкое качество инженерно-технических решений, не учитывающих все возможные воздействия на сооружение как в процессе строительства, так и при эксплуатации.
- В работе [2] также приводится классификация основных причин разрушения мостовых сооружений с указанием их весомости:
 - катастрофические природные воздействия (порядка 60 %);
- ошибки при разработке проектов, а также дефекты, возникшие в процессе строительства (около 30 %);
- пропуск сверхнормативной нагрузки либо ненадлежащая эксплуатация сооружения (порядка 10 %).

Системный подход к оптимизации системы «здание (сооружение) – технология – строительная конструкция – строительный материал» при внутренних и внешних ограничениях представлен в работах [3, 4], в которых указывается необходимость преодоления сложившейся практики узкоспециализированного рассмотрения отдельных аспектов создания строительного объекта. Формообразование – системное рассмотрение процесса проектирования – направлено на переход к разработке «конструктивного решения, которое обеспечивает реализацию творческого архитектурного замысла, соответствует материальным возможностям и технологическому исполнению в конкретных условиях взаимодействия с внешней средой при соблюдении общих и специальных требований надежности и комфортности эксплуатации» [4]. Также в указанной работе выделены общие принципы и требования к формообразованию конструкций, особое значение из которых имеет «комплексная связь архитектурного и конструкторского замыслов с выбором материалов и технологии изготовления» [4].

Уровневое разделение сложной иерархичной системы, как правило, приводит к естественной потере информации о ее системообразующих связях [5]. На практике переход с одного масштабного уровня на более высокий уровень приводит к естественному возникновению условий и требований, которые для рассматриваемого масштабного уровня являются основными, а условия и требования предыдущего уровня используются в качестве дополнительных или не учитываются. Указанное демонстрируют данные, представленные в табл. 1 и на рис. 1 и 2.

Таблица 1 Основные характеристики различных мостовых сооружений

Наименование мостового сооружения	Тип конструкции	Длина моста, м	Длина основного пролета, м	Ширина моста, м	Масса моста, т	Материал	Удельная материалоемкость, т/ m^2
Мост Харбор-Бридж, Сидней	арочный мост	1149	503	48,8	53800	сталь	0,96
Мост Акаси-Кайкё	висячий	3911	1991	33,5	160000	сталь	1,22
Мост Такома-Нэрроуз	висячий	1822	853	11,9	6440	сталь	0,30
Висячий мост Большой Бельт	висячий	2700	1624	31	35000	сталь	0,42
Мост через Кожуховский затон р. Москвы	балочный	350	150	35,9	4622,82	сталь	0,37
Ворошиловский мост (Ростов-на-Дону)	балочный	624	156	38,05	5322,1	сталь	0,22
Русский мост (центральный пролет)	вантовый	1248	1248	26	23000	сталь	0,71
Живописный мост	вантовый	1460	410	37	12000	сталь	0,22
Вантовый мост в Сочи	вантовый	552	300	17	4900	сталь	0,52
Саратовский мост	балочный	2825,8	166	15	45 000	железо- бетон	1,06
Мост Уддевалла	вантовый	1712	414	23,3	44 000	железо- бетон	1,10
Мост через Корабельный фарватер	вантовый	620	320	43,5	16584	стале- железо- бетон	0,61

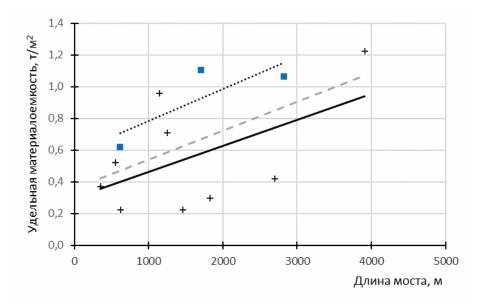


Рис. 1. Корреляционная зависимость «удельная материалоемкость — длина моста»: «+» — данные для мостовых сооружений, для которых основной вид материала — сталь; «■» — данные для мостовых сооружений, для которых основной вид материала — железобетон

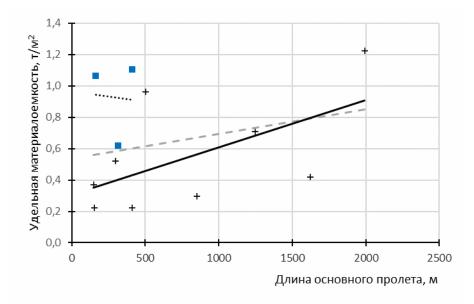


Рис. 2. Корреляционная зависимость «удельная материалоемкость – длина основного пролета моста»:

«+» – данные для мостовых сооружений, для которых основной вид материала – сталь; «•» – данные для мостовых сооружений, для которых основной вид материала – железобетон

Анализ мостовых сооружений (одного из представителей рассматриваемых технических систем) производился с применением данных, представленных как в открытых источниках информации, так в научно-технических отчетах, выполненных лабораторией аэродинамических и аэроакустических испытаний НИУ МГСУ. В качестве анализируемых характеристик выбраны: геометрические характеристики (общая длина, длина основного пролета, ширина моста), тип конструкции и масса моста, основной материал, из которого изготовлено мостовое сооружение. На основе указанных данных определена удельная материалоемкость моста (величина, равная отношению массы мостового сооружения к его суммарной площади).

Корреляционные зависимости «удельная материалоемкость — длина моста» и «удельная материалоемкость — длина основного пролета моста» представлены на рис. 1 и 2, а значения коэффициентов линейной корреляции — в табл. 2.

 $\label{eq:Tafnu} T~a~б~\pi~u~ц~a~2$ Значения коэффициентов линейной корреляции

	Коэффициент линейной корреляции						
Вид корреляционной	Без учета	С учетом вида материала					
зависимости	вида	Преимущественный вид материала					
	материала	Сталь	Железобетон				
Удельная материалоем-	0,55	0,54	0,82				
кость – длина моста	0,55	0,34					
Удельная материалоем-							
кость – длина основного	0,27	0,58	-0,06				
пролета моста							

Представленные данные демонстрируют или малые величины коэффициентов линейной корреляции и их незначительные отличия при использовании дополнительного условия (вид материала), или наличие противоположных тенденций (для корреляционной зависимости «удельная материалоемкость — длина основного пролета моста»).

В работах [6-10] представлен обширный перечень причин, возникновение которых приводит к авариям мостовых сооружений:

- недоучет ветровой нагрузки и аэродинамической неустойчивости;
- потеря устойчивости элементов;
- ошибки в технологии ведения строительно-монтажных и ремонтных работ;
- перегрузка несущих конструкций;
- возникновение резонанса или усталости материала;
- деградация материала и неблагоприятное воздействие эксплуатационной среды;
- недостаточная надежность и расстройство соединений;
- несоблюдение установленных габаритов перевозимых грузов и ударов подвижной нагрузки;
 - отсутствие технического надзора;
- появление дополнительных усилий и деформаций из-за геологических, гидрологических, оползневых и сейсмических явлений;
 - навал судов на опоры мостов;
- воздействие на конструкции моста экстремальных (форс-мажорных) нагрузок (столкновение с авиационной техникой, скоростным поездом, пожар, торнадо, диверсия, повреждения в результате аварий проложенных по ним коммуникаций и т.п.);
 - ошибки в расчетах, использование некачественного материала.

Из представленных причин в отдельную группу необходимо выделить причины, связанные со стабильностью свойств материала в процессе эксплуатации мостового сооружения. Очевидно, что изменение свойств материала в процессе эксплуатации закономерно отражается на конструктивных характеристиках сооружения.

Формирование и изменения эксплуатационных свойств материала являются естественным отражением процессов его структурообразования. На этапе формирования структуры – начальный этап структурообразования – создается потенциал сопротивляемости материала [11]. В период эксплуатации – эксплуатационный этап структурообразования – этот потенциал расходуется, и при его снижении до определенного уровня наступает разрушение материала. Важно отметить, что все факторы внешней среды часто взаимоусиливаются, что приводит к ускорению деградационных процессов в материале. В этой связи изолированное рассмотрение отдельных процессов деградации материала (частным является коррозия, рассмотренная в [12]) позволяет только установить механизмы этих процессов и выявить ключевые факторы. Необходимо отметить, что на начальных этапах экспозиции материала в агрессивной среде могут протекать процессы уплотнения структуры, которые способствуют повышению стойкости. Такое явление получило название «положительная коррозия» [13]. Вероятно, такое явление характерно только для случаев внешнего воздействия агрессивной среды. Для деградационных процессов, протекающих в теле материала, проявление положительной коррозии не зафиксировано. К такому типу деградации относится щелочная коррозия, вызванная щелочно-силикатными реакциями и являющаяся достаточно распространенным видом коррозионного разрушения цементных бетонов. В работе [14] показано, что совместное воздействие циклической механической нагрузки от транспорта и химических реагентов (антигололедных средств) может являться причиной ускоренного разрушения бетонной дороги вследствие протекания самополлерживающейся шелочной коррозии. Указанное справедливо и для мостовых сооружений. В этой связи определение особенностей и механизмов разрушения материала при протекании обменных процессов, установление динамики накопления повреждений при циклическом воздействии механической нагрузки, условий протекания коррозии и разработка технологических решений по предотвращению ускоренного разрушения бетона мостового сооружения являются актуальной научной задачей, имеющей практическое значение.

Мостовые сооружения относятся к аэроупругим конструкциям, которые в потоке воздуха являются принципиально неконсервативными системами, и в такие системы при определённом сочетании параметров конструкции и воздушного режима поступает энергия из потока, что может привести к разрушению самой конструкции.

Причем по мере увеличения длины пролета мостов нелинейные эффекты взаимодействия сооружения с потоком ветра возрастают.

В истории мостостроения известно более десяти случаев разрушения висячих и вантовых мостов вследствие аэродинамической неустойчивости. Одной из самых известных аварий в истории мостостроения является крушение после четырех месяцев эксплуатации моста Тэкома-Нэрроуз (США, 1940). А колебания моста через реку Волга в Волгограде 20 мая 2010 г. привлекло значительное внимание и вызвало общественный резонанс, в связи с происшествием мост получил неофициальное название «танцующий». Предполагается, что из-за значительной ветровой нагрузки мост вошел в резонанс с амплитудой колебаний в вертикальной плоскости [6].

Демпфирующая способность материала позволяет поглощать энергию на необратимые процессы при циклическом его деформировании. Именно поэтому при проектировании мостовых конструкций особое внимание уделяется демпфирующим свойствам материала, из которого они изготавливаются. Согласно ГОСТ Р ИСО 10112-99 материал конструкции, обладающий технически значимым демпфированием, называют вибродемпфирующим. Рассеяние энергии в вибродемпфирующем материале обусловлено межмолекулярным взаимодействием или взаимодействием узлов кристаллической решетки и может быть охарактеризовано петлей гистерезиса механического напряжения (деформации) в материале.

С демпфирующей способностью материала связаны явления аэроупругой неустойчивости. Так, при изгибно-крутильном флаттере, пока работа демпфирующих сил больше работы возбуждающих колебания дополнительных аэродинамических сил, возникшие колебания будут затухать. При скорости полета потока, соответствующей критической скорости флаттера, приток энергии, поддерживающей эти колебания и передаваемой подъемной силой от воздушного потока к конструкции, начинает превышать рассеивание энергии в колеблющейся конструкции, и работа возбуждающих колебания сил оказывается равной работе демпфирующих колебания сил. В результате частота и амплитуда колебаний резко возрастают и происходит мгновенное взрывообразное разрушение конструкции.

Аэроупругая неустойчивость – галопирование – связана с отрицательным аэродинамическим демпфированием, критическая скорость галопирования оценивается по формуле

$$U_{cr} = -\frac{2m_o \delta \xi_i}{\left[C_L' + C_B\right] \pi \rho B_0},\tag{1}$$

где m_0 — погонная масса конструкции; δ — логарифмический декремент колебаний (при V=0); ξ_i — собственная частота колебаний; ρ — плотность материала конструкции; B_0 — характерный размер конструкции.

Демпфирование весьма важно при исследовании вынужденных колебаний конструкций. Корректная оценка уровня демпфирования необходима для оценки динамического отклика конструкций. Известно, что в случае возникновения вихревого резонанса пролетного строения амплитуды колебаний будут сильно зависеть от уровня демпфирования [15]:

$$A = \frac{P}{2\pi f C},\tag{2}$$

где A — амплитуда вынужденных колебаний; P — амплитуда силы, вызывающей гармонические колебания; f — частота силы, вызывающей гармонические колебания; C — коэффициент демпфирования.

Иногда при проектировании мостовых конструкций для обеспечения демпфирования используются гасители колебаний – демпферы. Но даже если демпферы не устанавливаются, то конструкция все равно обладает демпфированием, обеспеченным

демпфирующей способностью материала, особенно если сама конструкция обладает достаточным весом.

При этом экспериментальное определение демпфирующей способности материала является более сложной задачей, чем определение любой другой его механической характеристики [16].

Если задача моделирования внешних эффектов гашения колебаний (внешнего трения) является сравнительно несложной, то задача учёта внутреннего трения в материале до сих пор не имеет однозначного решения, применимого к динамическим расчетам конструкций различных типов из разных материалов на различных диапазонах частот. В настоящее время универсальность ни одной из существующих моделей внутреннего трения в материале не подтверждена экспериментально [17].

Таким образом, выбор материала для строительства мостов является важной и ответственной задачей. Известно, что стальные мосты характеризуются низким уровнем демпфирования, что может привести к чрезмерной амплитуде колебаний [15]. В работе [18] показано, что деревянные мосты с асфальтовым покрытием увеличивают уровень демпфирования.

В последние годы в гражданском и транспортном строительстве все более активно используются современные композитные материалы с «управляемыми» физикомеханическими свойствами. Основной особенностью композитных материалов с позиции демпфирующей способности является совмещение в едином конгломерате, для которого характерна эмерджентность составляющих (фаз композита), обладающих различными упругими и демпфирующими свойствами. Другой важной особенностью композитных материалов является их ортотропность или даже анизотропность [17].

Композитные материалы обладают лучшими диссипативными свойствами по сравнению с металлами и их сплавами, а их логарифмический декремент затухания на порядок выше, чем у металлов. При этом экспериментальные данные по демпфирующей способности композитных материалов и их логарифмическому декременту существенно различаются [19-22]. В работе [23] показано, что демпфирующие характеристики зависят от интенсивности нагружения.

В работе [24] рассматриваются способы усиления железобетонных мостовых конструкций, в том числе усиление композиционными материалами на основе углеродных волокон в полимерном связующем.

Известно, что упрочнение металлических материалов достигается их легированием или термической обработкой [25], а также путем уменьшения размера их структурных элементов (зерен, включений, двойников и др.), в особенности при переходе в наноразмерную область [26]. Однако оба эти способа приводят к ухудшению диссипативных свойств материала.

Высокая концентрация дефектов и неравновесное состояние структуры нанокристаллических материалов приводят к значительному росту демпфирующей способности (внутреннего трения). Поэтому исследование демпфирования в нанокристаллических материалах после больших пластических деформаций является в настоящее время важной и интересной задачей. В [27] обсуждаются последние достижения в изучении демпфирующей способности и структурных особенностей нанокристаллических материалов для различных металлов и сплавов, показаны типичные примеры нанокристаллических материалов с высокой демпфирующей способностью, таких, как медь, алюминий и некоторые сплавы.

В работе [28] приведены результаты исследования свойств нанокомпозита на основе системы Al-Cr-Fe и показано, что данный материал относится к высокодемпфирующим материалам с высокой микротвердостью, демпфирующая способность которого не зависит от температуры в диапазоне $20...300\,^{\circ}$ C; установлено, что нанокомпозитные покрытия на основе системы Al-Cr-Fe толщиной 40 мкм обеспечивают увеличение демпфирующей способности в 2,5...3 раза.

В работе [29] для увеличения демпфирующей способности конструкций предлагается наносить на поверхность механических систем покрытия из полимерных материалов с высокими вибропоглощающими свойствами.

В [30] предложен способ демпфирования колебаний тонкостенных оболочек за счет использования многослойных самоклеящихся эластомерных покрытий. В [31] представлены результаты исследований по выбору соотношения толщин слоев в слоеной вибропоглощающей конструкции с вязкоупругим слоем из битумно-каучуковой мастики и его свойствами. В работе [17] предложена методика численного моделирования материального демпфирования при динамических воздействиях на конструкции.

Важным аспектом оценки устойчивости аэроупругих мостовых конструкций в ветровом потоке является проведение физических экспериментов по моделированию нелинейных задач строительной аэродинамики в специализированных лабораториях – аэродинамических трубах – на динамически подобных моделях, где одной из основных моделируемых характеристик является уровень демпфирования реальной конструкции [32]. При проведении таких исследований, учитывающих особенности моделирования нелинейных задач и их высокую чувствительность к исходным данным и условиям проведения экспериментального исследования, появляется возможность оценить устойчивость конструкций, созданных из различных материалов, и при необходимости рассчитать требуемые параметры гасителей колебаний – демпферов [33].

Таким образом, оптимизация сложной многоуровневой технической системы «здание (сооружение) - строительная конструкция - строительный материал» имеет общую задачу, которая четко сформулирована в направлении, основанном на системном анализе – формообразовании, и несколько частных задач, формулирование которых возможно только применительно к конкретной системе. Для мостовых сооружений такими частными задачами являются разработка нового научно обоснованного технологического решения по получению строительного конструкционного материала с требуемыми эксплуатационными свойствами и регулируемым структурообразованием и проведение физических экспериментов на динамически подобных моделях мостовых сооружений для определения уровня демпфирования реальной конструкции, оценки устойчивости конструкций, созданных из различных материалов, а также решение обратной задачи – установление требований к материалам для мостовых сооружений. Кроме того, важно отметить, что аналогичные результаты представленного системного анализа получены при исследовании частной технической системы «здание - технология - конструкция - материал», определяющей пожарную безопасность эксплуатации зданий и сооружений.

Список литературы

- 1. Караханян, В.Б. Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям / В.Б. Караханян, И.И. Овчинников, М.А. Баев, И.Г. Овчинников // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2020. №2. URL: https://t-s.today/PDF/12SATS220.pdf (доступ свободный). DOI: 10.15862/12SATS220
- 2. Енджиевский, Л.В. История аварий и катастроф / Л.В. Енджиевский, А.В. Терешкова. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. 375 с.
- 3. Фридкин, В.М. Формообразование строительных конструкций / В.М. Фридкин. М.: МГСУ, 2011. 171 с.
- 4. Деордиев, С.В. Формообразование строительных конструкций. Общие и частные принципы / С.В. Деордиев, Н.П. Абовский, Л.В. Енджиевский, И.С. Инжутов, В.И. Палагушкин // Известия вузов. Строительство. − 2013. − №11−12. − С. 13−20.
- 5. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. М.: МГСУ, 2012.-432 с.
- 6. Овчинников, И.И. Аварии транспортных сооружений и их предупреждение / И.И. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников, И.С. Шатилов. Чебоксары: ИД «Среда», 2020. 216 с.
- 7. Майстренко, И.Ю. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Ч. 1 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, А.В. Кокодеев // Ин-

- тернет-журнал «Транспортные сооружения». 2017. Т. 4, №4. URL: https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf (доступ свободный). DOI: 10.15862/13TS417.
- 8. Овчинников, И.Г. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Ч. 2 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, А.В. Кокодеев // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». -2017. -T.4, №4. URL: https://ts.today/PDF/14TS417.pdf (доступ свободный). DOI: 10.15862/14TS417.
- 9. Майстренко, И.Ю. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Ч. 3 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, А.М. Успанов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». -2018. -№1. URL: https://ts.today/PDF/08SATS118.pdf (доступ свободный). DOI: 10.15862/08SATS118.
- 10. Овчинников, И.И. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Ч. 4 / И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, И.Г. Овчинников, А.М. Успанов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». − 2018. − №1. − URL: https://ts.today/PDF/05SATS118.pdf (доступ свободный). − DOI: 10.15862/05SATS118.
- 11. Королев, Е.В. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, А.И. Альбакасов. Пенза-Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. 364 с.
- 12. Овчинникова, Т.С. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций / Т.С. Овчинникова, А.Н. Маринин, И.Г. Овчинников // Интернет-журнал «Науковедение». -2014. -№5(24). Идентификационный номер статьи в журнале: 06KO514. URL: https://naukovedenie.ru/PDF/06KO514.pdf (доступ свободный).
- 13. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композитных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. М.: Стройиздат, 1987. 264 с.
- 14. Брайтенбюхер, Р. Взаимодействие щелочей с кремнеземом в бетонных дорожных покрытиях / Р. Брайтенбюхер, Р. Пшондзионо // Цемент и его применение. -2015. -№4. -C.95-101.
- 15. Pańtak, M. Vibration damping in steel footbridges / M. Pańtak, B. Jarek, K. Marecik // 9th International Symposium on Steel Bridges. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 419. 012029. Doi:10.1088/1757-899X/419/1/012029
- 16. Демина, М.А. Экспериментальное определение коэффициентов демпфирования полимерных слоистых композиционных материалов / М.А. Демина, А.Ю. Муйземнек // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы: сб. науч. ст. VI Всероссийской межвузовской научно-практической конференции / под ред. Л.Р. Фионовой. 2019. С. 127–129.
- 17. Шепитько, Е.С. Модель нелокального демпфирования материала при расчете стержневых систем: дис. ... канд. техн. наук (05.23.17) / Е.С. Шепитько. М., 2019. 119 с.
- 18. Schubert, S. Influence of asphalt pavement on damping ratio and resonance frequencies of timber bridges / S. Schubert, D. Gsell, R. Steiger, G. Feltrin // Engineering Structures. -2010.-V.32.-P.3122-3129.
- 19. Бондаренко, А.А. Затухание колебаний в стеклопластиковых цилиндрических оболочках / А.А. Бондаренко, П.И. Галака, А.М. Носаченко // Прикладная механика. 1969. Т.5, № 9. С. 121–124.
- 20. Пелех, Б.Л. Экспериментальные методы исследования динамических свойств композиционных структур / Б.Л. Пелех, Б.И. Саляк. Киев: Наукова думка, 1990. 133 с.
- 22. Писаренко, Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: справочник / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. Киев: Наукова думка, 1971.-375 с.
- 23. Демешкин, А.Г. Демпфирующие характеристики композитных конструкционных материалов, изготовленных намоткой / А.Г. Демешкин, М. Е. Козеко, В.М. Корнев, В.Д. Кургузов // Прикладная механика и техническая физика. -2001. Т. 42, № 1. С. 190-195.

- 24. Овчинников, И.Г. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций / И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников, В.С. Зиновьев, А.Д. Умиров // Интернет-журнал «Науковедение». − 2012. − №4 (13). − Идентификационный номер статьи в журнале: 7ТВН412. − URL: https://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf (доступ свободный).
- 25. Головин, С.А Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов / С.А Головин, А. Пушкар, Д.М. Левин. М.: Металлургия, 1987. 191 с.
- 26. Андриевский, Р.А. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. Особенности структуры. Термодинамика Фазовые равновесия. Кинетические явления / Р.А. Андриевский, А.М. Глезер // Физика металлов и металловедение. 1999. №1. С. 50—73.
- 27. Мулюков, Р.Р. Демпфирование нанокристаллических материалов: обзор / Р.Р. Мулюков, А.И. Пшеничнюк, Ю.А. Баимова // Письма о материалах. -2015.-T.5, N04. -C.485-490.
- 28. Устинов, А.И. Влияние покрытий из нанокомпозитов на демпфирующую способность титановых рабочих лопаток компрессоров АГТД / А.И. Устинов, В.Н. Тараненко, В.А. Теличко, В.С. Скородзиевский, А.П. Зиньковский, И.Г. Токарь, В.А. Круц // Вибрации в технике и технологии. − 2011. №3(63). C. 74–78.
- 29. Чернышев, В.М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов / В.М. Чернышев. М.: Наука, 2004. 287 с.
- 30. Сапожников, С.Б. Демпфирование колебаний тонких оболочек слоистыми покрытиями / С.Б. Сапожников, Б.П. Кузьменко // Вестник ПНИПУ. Механика. 2010. №2. С. 98–103.
- 31. Черкасов, В.Д. Вибропоглощающие свойства слоеных материалов / В.Д. Черкасов, А.С. Смиркин, А.В. Бородин // Региональная архитектура и строительство. 2020. №1 (42). С. 45–51.
- 32. Казакевич, М.И. Ветровая безопасность конструкций. Теория и практика / М.И. Казакевич. М.: Ин-т «Гипростроймост», 2015. 287 с.
- 33. Наумова, Г.А. Оценка экономической эффективности устройства гидродинамического гасителя для предотвращения колебаний на Волгоградском мосту / С.А. Пономаренко, Г.А. Наумова, Я.А. Борисанова // Современные железные дороги: достижения, проблемы, образование: материалы V Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. Волгоград: Волгоградское научное изд-во, 2012. С. 37–42.

Reference

- 1. Karakhanyan, V.B. Features of progressive destruction in relation to bridge structures / V.B. Karakhanyan, I.I. Ovchinnikov, M.A. Baev, I.G. Ovchinnikov // Internet magazine «Transport structures». − 2020. − №2. − URL: https://t-s.today/PDF/12SATS220.pdf (free access). DOI: 10.15862 / 12SATS220
- 2. Endzhievsky, L.V. History of accidents and catastrophes / L.V. Endzhievsky, A.V. Tereshkova. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013. 375 p.
- 3. Fridkin, V.M. Formation of building structures / V.M. Fridkin. M.: MGSU, 2011. 171 p.
- 4. Deordiev, S.V. Forming of building structures. General and private principles / S.V. Deordiev, N.P. Abovskiy, L.V. Endzhievsky, I.S. Inzhutov, V.I. Palagushkin // Izvestiya vuzov. Building. − 2013. − №. 11−12. − P. 13−20.
- 5. Bazhenov, Yu.M. System analysis in building materials science / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. M.: MGSU, 2012. 432 p.
- 6. Ovchinnikov, I.I. Accidents of transport facilities and their prevention / I.I. Ovchinnikov, Sh.N. Valiev, I. G. Ovchinnikov, I.S. Shatilov. Cheboksary: Publishing House «Sreda», 2020. 216 p.

- 7. Maystrenko, I.Yu. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. P. 1 / I.Yu. Maistrenko, I.I. Ovchinnikov, I. G. Ovchinnikov, A.V. Kokodeev // Internet magazine «Transport structures». − 2017. − Vol. 4, №4. − URL: https://ts.today/PDF/13TS417.pdf (free access). − DOI: 10.15862 / 13TS417.
- 8. Ovchinnikov, I.G. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. P.2 / I.G. Ovchinnikov, I.I. Ovchinnikov, I. Yu. Maystrenko, A.V. Kokodeev // Internet magazine «Transport structures». − 2017. − Vol. 4, №4. − URL: https://ts.today/PDF/14TS417.pdf (free access). − DOI: 10.15862 / 14TS417.
- 9. Maystrenko, I.Yu. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. P. 3 / I.Yu. Maistrenko, I.I. Ovchinnikov, I. G. Ovchinnikov, A.M. Uspanov // Internet magazine «Transport structures». 2018. Ne1. URL: https://ts.today/PDF/08SATS118.pdf (free access). DOI: 10.15862 / 08SATS118.
- 10. Ovchinnikov, I.I. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. P. 4 / I.I. Ovchinnikov, I. Yu. Maistrenko, I.G. Ovchinnikov, A.M. Uspanov // Internet magazine «Transport structures». − 2018. − №1. − URL: https://ts.today/PDF/05SATS118.pdf (free access). − DOI: 10.15862 / 05SATS118.
- 11. Korolev, E.V. Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials / E.V. Korolev, Yu.M. Bazhenov, A.I. Albakasov. Penza-Orenburg: IPK OSU, 2010. 364 p.
- 12. Ovchinnikova, T.S. Corrosion and anticorrosive protection of reinforced concrete bridge structures. Ovchinnikova, A.N. Marinin, I. G. Ovchinnikov // Naukovedenie Internet magazine. − 2014. − №5 (24). − ID number of the article in the journal: 06KO514. − URL: https://naukovedenie.ru/PDF/06KO514.pdf (free access).
- 13. Solomatov, V.I. Chemical resistance of composite building materials / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev. M.: Stroyizdat, 1987. 264 p.
- 14. Breitenbücher, R. Interaction of alkalis with silica in concrete road surfaces / R. Breitenbücher, R. Pshondziono // Cement and its application. − 2015. − №. 4. − P. 95–101.
- 15. Pańtak, M. Vibration damping in steel footbridges / M. Pańtak, B. Jarek, K. Marecik // 9th International Symposium on Steel Bridges. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 419. 012029. Doi: 10.1088 / 1757-899X / 419/1/012029
- 16. Demina, M.A. Experimental determination of the damping coefficients of polymeric layered composite materials / M.A. Demina, A. Yu. Muisemnek // Information technologies in science and education. Problems and Prospects: collection of scientific articles of the VI All-Russian interuniversity scientific-practical conference / ed. L.R. Fionova. 2019. P. 127–129.
- 17. Shepitko, E.S. Model of nonlocal damping of material in the calculation of rod systems: Dis. ... Cand. of Sciences (05.23.17) / E.S. Shepitko. M., 2019. 119 p.
- 18. Schubert, S. Influence of asphalt pavement on damping ratio and resonance frequencies of timber bridges / S. Schubert, D. Gsell, R. Steiger, G. Feltrin // Engineering Structures. -2010.-V. 32. -P. 3122–3129.
- 19. Bondarenko, A.A. Attenuation of vibrations in fiberglass cylindrical shells / A.A. Bondarenko, P.I. Galaka, A.M. Nosachenko // Applied Mechanics. 1969. Vol.5, № 9. P. 121–124.
- 20. Pelekh, B.L. Experimental methods of investigating the dynamic properties of composite structures / B.L. Pelekh, B.I. Salak. Kiev: Naukova Dumka, 1990. 133 p.
- 22. Pisarenko, G.S. Vibration-damping properties of construction materials: handbook / G.S. Pisarenko, A.P. Yakovlev, V.V. Matveev. Kiev: Naukova Dumka, 1971. 375 p.
- 23. Demeshkin, A.G. Damping characteristics of composite construction materials made by winding / A.G. Demeshkin, M.E. Kozeko, V.M. Kornev, V.D. Kurguzov // Applied Mechanics and Technical Physics. -2001. Vol. 42, N01. P. 190–195.
- 24. Ovchinnikov, I.G. Issues of reinforcing reinforced concrete structures with composites: 1. Experimental studies of the features of reinforcing bending reinforced concrete structures by composites / I.G. Ovchinnikov, Sh.N. Valiev, I.G. Ovchinnikov, V.S. Zinoviev, A.D. Umirov // Naukovedenie Internet magazine. − 2012. − №4 (13). − Identification number of the article in the journal: 7TVN412. − URL: https://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf (free access).

- 25. Golovin, SA Elastic and damping properties of structural metallic materials / S.A. Golovin, A. Pushkar, D.M. Levin. M.: Metallurgy, 1987. 191 p.
- 26. Andrievsky, R.A. Dimensional effects in nanocrystalline materials. Features of the structure. Thermodynamics Phase equilibria. Kinetic phenomena / R.A. Andrievsky, A.M. Glezer // Physics of metals and metal science. − 1999. − № 1. − P. 50–73.
- 27. Mulyukov, R.R. Damping of nanocrystalline materials: a review / R.R. Mulyukov, A.I. Pshenichnyuk, Yu.A. Baimova // Letters about materials. 2015. –Vol.5, №4. P. 485–490.
- 28. Ustinov, A.I. Influence of nanocomposite coatings on the damping ability of titanium rotor blades of AGTD compressors / A.I. Ustinov, V.N. Taranenko, V.A. Telichko, V.S. Skorodzievsky, A.P. Zinkovsky, I.G. Turner, V.A. Kruts // Vibrations in engineering and technology. − 2011. − №3 (63). − P. 74–78.
- 29. Chernyshev, V.M. Damping of vibrations of mechanical systems with coatings made of polymeric materials / V.M. Chernyshev. M.: Nauka, 2004. 287 p.
- 30. Sapozhnikov, S.B. Damping of vibrations of thin shells with layered coatings / S.B. Sapozhnikov, B.P. Kuzmenko // Bulletin of PNRPU. Mechanics. 2010. № 2. P. 98–103.
- 31. Cherkasov, V.D. Vibration-absorbing properties of layered materials / V.D. Cherkasov, A.S. Smirkin, A.V. Borodin // Regional architecture and construction. 2020. № 1 (42). P. 45–51.
- 32. Kazakevich, M.I. Wind safety of structures. Theory and practice / M.I. Kazakevich. M.: In-t «Giprostroymost», 2015. 287 p.
- 33. Naumova, G.A. Evaluation of the economic efficiency of a hydrodynamic damper device to prevent vibrations on the Volgograd bridge / S.A. Ponomarenko, G.A. Naumova, Ya.A. Borisanova // Modern railways: achievements, problems, education: materials of the V All-Russian scientific and practical. conf. with int. participation. Volgograd: Volgograd Scientific Publishing House, 2012. P. 37–42.

УДК 691.542:666.951

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, Саранск, ул. Большевистская, д. 68

Черкасов Василий Дмитриевич,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Прикладная механика» E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Бузулуков Виктор Иванович,

доктор технических наук, проф., профессор кафедры «Прикладная механика»

E-mail: buzulukov-v@mail.ru

Емельянов Алексей Иванович,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика» E-mail: emeljanovai@list.ru

Черкасов Дмитрий Васильевич,

кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Прикладная механика» E-mail: dv-cherkasov@yandex.ru

Mordovian State University named after N.P. Ogarev Russia, 430005, Saransk, 68, Bolshevistskaya St.

Cherkasov Vasiliy Dmitrievich,

Doctor of Science, Professor, Head of the department «Applied mechanics» E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Buzulukov Victor Ivanovich,

Doctor of Sciences, Professor of the department «Applied mechanics» E-mail: buzulukov-v@mail.ru

Emelianov Aleksey Ivanovich,

Candidate of Sciences, Assistant Professor of the department «Applied mechanics» E-mail: emeljanovai@list.ru

Cherkasov Dmitry Vasilyevich,

Candidate of Sciences, lecturer of the department «Applied mechanics» E-mail: dv-cherkasov@yandex.ru

МИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА НА ОСНОВЕ КАРБОНИЗОВАННОГО ДИАТОМИТА

В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, А.И. Емельянов, Д.В. Черкасов

Проведены исследования по получению эффективных тонкодисперсных упрочняющих добавок в цементные композиты. Разработан способ карбонизации поверхности частиц природного диатомита с целью повышения эффективности его применения в качестве компонентов бетона и строительных растворов. Показано, что результатом предлагаемого способа модифицирования является значительное возрастание количественного содержания активных центров кристаллизации продуктов гидратации цемента. Установлено, что введение в цементные системы модифицированного диатомита в количестве 0,75 % от массы цемента повышает предел прочности образцов при сжатии на 40 %, а предел прочности на изгиб на 80 %.

Ключевые слова: диатомит, карбонизация, углеродные микрочастицы, цементный композит, прочность

MINERAL ADDITIVE BASED ON CARBONIZED DIATOMITE

V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, A.I. Emelianov, D.V. Cherkasov

Some research has been carried out to obtain effective fine-dispersed reinforcing additives for cement composites. A method of carbonization natural diatomite particles surface has been developed to increase the efficiency of its application as a component of concrete and mortars. It is shown that the result of the method of modification is a significant increase in the quantitative content of active crystallization centers of cement hydration products. It is found that the introduction of modified diatomite into cement systems in an amount of 0.75 % by weight of cement increases the tensile strength of the samples under compression by 40 %, and the bending strength by 80 %.

Keywords: diatomite, carbonation, carbon microparticles, cement composite, strength

В настоящее время актуальной задачей в строительстве является разработка технологии производства высококачественных бетонов. Получение высококачественных бетонов различного функционального назначения достигается модифицированием его структуры различными органическими и минеральными добавками. Вводимые в

незначительных количествах модифицирующие добавки оказывают влияние на процессы гидратации и кристаллизации, морфологию новообразований и в целом на структуру затвердевшего цементного камня, изменяя тем самым свойства бетона – прочность, пористость, водонепроницаемость, усадку и трещиностойкость и т.д. [1–5].

Кремнеземсодержащие природные минералы широко используются в строительстве в качестве компонентов теплоизоляционных материалов, товарных бетонов и других цементосодержащих композитов. К высококремнеземистым сырьевым материалам относится и диатомит. Средняя плотность диатомитов в сухом состоянии колеблется в пределах $150\text{-}600~\text{кг/m}^2$. Диатомиты в природном состоянии обладают способностью к адсорбции, плохой теплопроводностью, тугоплавкостью и кислотостойкостью, а также мелкой, равномерно распределенной, преимущественно замкнутой пористостью, достигающей 80-85~%. Гидраты кремнезема (опалы $\text{SiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$), являющиеся основным компонентом диатомитов, в качестве примеси содержат глиноземистые вещества, карбонаты и сульфаты натрия, кальция и магния, а иногда и примеси органических веществ.

Активность диатомита как минеральной добавки в цементы обусловлена содержанием диоксида кремния в основном в аморфном состоянии (40-100 % от общего количества SiO₂). Повышения активности диатомита можно добиться путем его модифицирования.

Основное внимание при модифицировании частиц диатомита обращается на изменение реакционноспособных силанольных групп на поверхности кремнезема, а не в его структуре. Силанольные группы довольно активны и сравнительно легко реагируют с различными органическими и минеральными веществами, так как протон силанольной группы имеет слабокислый характер и способен вступать в реакции обмена. Многие методы модифицирования диатомитов, с целью использования их в качестве добавок в цементсодержащие системы, связаны именно с повышением количества этих групп, по которым можно прививать другие группы различной функциональной направленности [6, 7]. Благодаря этим реакционноспособным группам, в результате поэтапного их химического модифицирования, на поверхности частиц диатомита можно закрепить углеродные микрочастицы. Микрочастицы углерода будут активными центрами кристаллизации новых фаз в затворенной цементной системе, что позволит улучшить структуру цементного камня на микроуровне и тем самым повысить прочность конечного материала.

С целью подтверждения рассмотренного предположения разработан химический метод модифицирования поверхности частиц диатомита микрочастицами углерода. Этот наиболее оптимальный метод заключался в следующем: в стеклянный реактор, снабженный перемешивающим устройством, термометром и шариковым холодильником, помещали раствор одного из перечисленных органических соединений: бутанол-1, карбоксиметилцеллюлозу, поливиниловый спирт, полиэтиленгликоль. Затем раствор нагревали до 60 °C, добавляли диатомит и тщательно перемешивали в течение 2 часов. Массовое соотношение жидкой и твердой фаз составляло 5:1. Полученную смесь охлаждали, осадок отфильтровывали, удаляли физически сорбированный растворитель при пониженном давлении. Далее диатомит подвергали термической обработке в кварцевом реакторе при температуре 360-380 °C в атмосфере азота в течение 2 часов. В результате на поверхности диатомита прививаются частицы, которые состоят более чем на 90 % из углерода и размер которых может быть от 40 нм и выше [8, 9]. Эти частицы в дальнейшем будем называть микрочастицами углерода. Как было установлено экспериментально, предварительное модифицирование диатомита можно производить адсорбцией не только органического соединения из жидкой фазы, как показано выше, но и летучего органического соединения из газовой фазы. Наличие частиц углерода на поверхности модифицированного диатомита было подтверждено методом оптической микроскопии на микроскопе «Nikon Eclipse LV150» (рис. 1).



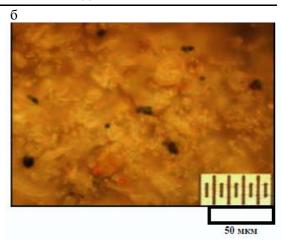


Рис. 1. Микроснимки поверхности диатомита: а – немодифицированный; б – после модифицирования

Из приведенных снимков видно, что на поверхности немодифицированного диатомита отсутствуют углеродные микрочастицы (рис. 1,а). Между тем, при прокаливании образцов модифицированных диатомитов в атмосфере азота при температуре 360–400 °C наблюдается образование микрочастиц углерода, количество и размер которых зависят от природы модификатора (рис. 1,б). Это может свидетельствовать о том, что органическое вещество, адсорбированное на поверхности кремнезема диатомита, при прокаливании в атмосфере азота действительно распадается в основном до углерода. Подтверждением того, что образовавшиеся микрочастицы черного цвета на поверхности диатомита состоят в основном из углерода, является их полное исчезновение после прокаливания этих образцов на воздухе при 360°C.

Элементный анализ диатомита, предварительно модифицированного различными органическими соединениями, показал увеличение содержания углерода в них в отличие от немодифицированного. Наиболее значительное повышение содержания углерода наблюдали при модифицировании раствором поливинилового спирта (см. таблицу). Элементный анализ проводился методом EDS на растровом электронном микроскопе Quanta 200i 3D FEI.

№	Образец	Состав, масс. %								
Π/Π		О	Si	C	Al	Fe	N	K	Mg	Ca
1	Диатомит	50,11	38,95	2,55	3,21	1,78	1,37	0,94	0,56	0,58
	немодифицированный*									
2	Диатомит, предваритель-	48,57	38,64	6,75	2,80	1,70	_	0,75	0,51	0,28
	но модифицированный									
	1 % раствором поливи-									
	нилового спирта									

Элементный состав диатомита

Предлагаемый способ позволяет получить модифицированный диатомит, результатом применения которого является значительное увеличение количественного содержания активных центров кристаллизации продуктов гидратации цемента, а их равномерное распределение в объеме цементной смеси исключает образование дефектов цементной системы, отражающихся, в частности, в неравномерности изменения объема.

Экспериментально было выявлено, что в результате модифицирования количество активных кислотных центров на поверхности диатомита уменьшилось в 1,5 раза, что свидетельствует о том, что нанесенные микрочастицы углерода блокируют в основном активные силанольные группы поверхности. Измерение количества кислотных цент-

^{* –} использован диатомит, предварительно прокаленный в вышеуказанных условиях.

ров на поверхности проводилось методом определения обменной емкости по отношению к ионам кальция [10].

С целью определения эффективности карбонизации диатомита по разработанной методике было изучено его влияние на прочностные характеристики цементных композитов. Эксперименты проведены с цементно-песчаным раствором стандартного состава (мелкозернистый бетон): $\Pi \coprod M 500- Д0-500$ г; песок стандартный -1500 г; водоцементное отношение $B/\coprod -0,45$. Испытания образцов проводились после 28 сут твердения в нормально-влажностных условиях. В качестве добавки использовали диатомит, предварительно модифицированный 1% раствором поливинилового спирта. Исследования показали, что введение в цементные системы модифицированного диатомита в количестве 0,75% от массы цемента повышает предел прочности образцов при сжатии на 40%, а предел прочности на изгиб на 80% (рис. 2,3).

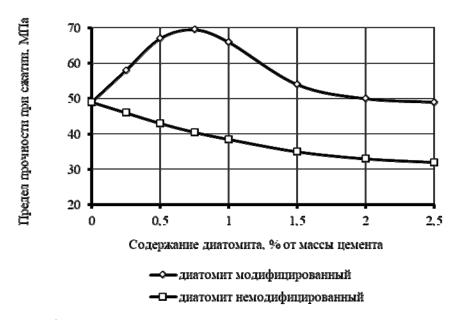


Рис. 2. Влияние содержания диатомита на предел прочности при сжатии цементных композитов



Рис. 3. Влияние содержания диатомита на предел прочности на изгиб цементных композитов

Таким образом, разработанный метод модифицирования поверхности диатомита существенно повышает эффективность его применения в качестве компонента строительных растворов. При относительно малой дозировке активированных диатомитов возможно получение цементных композитов с высокими прочностными характеристиками.

Список литературы

- 1. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. М.: АСВ, 2006. 368 с.
- 2. Строкова, В.В. Оценка влияния кристаллических затравок на структурообразование цементного камня / В.В. Строкова, Л.Н. Соловьева // Строительные материалы. -2009. -№3. -C. 97–98.
- 3. Макридин, Н.И. О микроструктуре и синтезе прочности цементного камня с добавками ГСК / Н.И. Макридин, В.Н. Вернигорова, И.Н. Максимова // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. №8. С. 37–42.
- 4. Дворкин, Л.И., Основы бетоноведения / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. СПб.: ИнфоОл, 2006. 690 с.
- 5. Kurdowski, W. Cement and Concrete Chemistry. Springer Dordrecht Heidelberg / W. Kurdowski. New York; London, 2014. 699 p.
- 6. Черкасов, В.Д. Разработка тонкодисперсных упрочняющих добавок для цементных систем / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, А.И. Емельянов, Д.Н. Пронин // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. №2. С.109–116.
- 7. Черкасов, В.Д. Модификация цементного камня комплексной добавкой на основе супер- и гиперпластификатора и углеродного порошка / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, Д.Н. Пронин // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 4 (29). С. 40–49.
 - 8. Буянов, Р.А. Закоксование катализаторов / Р.А. Буянов. М.: Наука, 1983. 120 с.
- 9. Гашимов, Ф.А. Продукты уплотнения в процессе превращения этилена на высококремнеземном цеолитном катализаторе / Ф.А. Гашимов // ЖПХ. -2009. Т.82, № 5. С. 850-855.
- 10. Ядыкина, В.В. Влияние физико-химической обработки на реакционную способность кварцевого заполнителя при формировании цементно-песчаных бетонов: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Ядыкина. Белгород, 1987. 211 с.

References

- 1 .Bazhenov, Yu.M. Modified high quality concrete / Yu.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. M.: ASV, 2006. 368 p.
- 2. Strokova, V.V. Evaluation of the influence of crystalline primers on the structure formation of cement stone / V.V. Strokova, L.N. Solov'eva // Building materials. 2009. No. 3. P. 97–98.
- 3. Makridin, N.I. On the microstructure and the synthesis of the strength of cement with additives GSK / N.I. Makridin, V.N. Vernigorova, I.N. Maksimova // Proceedings of higher educational institutions. Building. 2003. No. 8. P. 37–42.
- 4. Dvorkin, L.I. Fundamentals of concrete science / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin. St. Petersburg, 2006. 690 p.
- 5. Kurdowski, W. Cement and Concrete Chemistry. Springer Dordrecht Heidelberg / W. Kurdowski. New York; London, 2014. 699 p.
- 6. Cherkasov, V.D. Development of fine-dispersed reinforcing additives for cement systems / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, A.I. Emel'yanov, D.N. Pronin // Proceedings of higher educational institutions. Building. 2018. No. 2. P. 109–116.
- 7. Cherkasov, V.D. Modification of cement stone by a complex additive on the basis of super- and Hyper plasticizers and carbon powder / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, D.N. Pronin // Regional architecture and engineering. 2016. No. 4 (29). P. 40–49.

- 8. Buyanov, R.A. Coking of catalysts / R.A. Buyanov. M.: Nauka, 1983. –120 p.
- 9. Gashimov, F.A. Compaction products in the process of ethylene transformation on a high-silica zeolite catalyst / F.A. Gashimov // ZhPH. 2009. Vol. 82, №5. P. 850–855.
- 10. Yadykina V.V. Influence of physical and chemical treatment on the reactivity of quartz aggregate in the formation of cement-sand concrete: Dis. ... cand. of Sciences / V.V. Yadykina. Belgorod, 1987. 211 p.

УДК 519.7:69

Московский политехнический университет Россия, 107023, г. Москва, ул. Б.Семёновская, д. 38

Будылина Евгения Александровна,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Инфокогнитивные технологии»

E-mail: bud-ea@yandex,ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гарькина Ирина Александровна,

доктор технических наук, профессор кафедры «Математика и математическое моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,

доктор технических наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой «Математика и математическое моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University Russia, 107023, Moscow, 38, B.Semenovskaya St.

Budylina Eugenia Aleksandrovna,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the department «Infocognitive Technologies» E-mail: bud-ea@yandex,ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Garkina Irina Aleksandrovna,

Doctor of Sciences, Professor of the department «Mathematics and Mathematical Modeling» E-mail: fmatem@pguas.ru

Danilov Alexander Maksimovich,

Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, Head of the department «Mathematics and Mathematical Modeling»

E-mail: fmatem@pguas.ru

СИНТЕЗ КОМПОЗИТОВ: ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Рассматриваются некоторые актуальные вопросы обработки данных при проектировании и эксплуатации композиционных материалов как сложных систем. Идентификация рассматривается как процесс порождения знания, необходимого для внедрения в практику методов и алгоритмов математики. Указывается, что оперативное управление состоит из фрагментов глобальной задачи управления качеством (критерии должны отслеживаться). Большинство из рассматриваемых задач можно решить лишь на междисциплинарном уровне (желательно каждый фрагмент локальной или глобальной задачи — в пределах одной дисциплины) с подготовкой соответствующего интеллектуального потенциала внутри различных дисциплинарных научных школ. Человек имеет безусловный приоритет при создании автоматизированных систем оценки качества с применением алгоритмов параметрической идентификации. Приводятся некоторые представления процессов формирования свойств и их аппроксимация.

Ключевые слова: сложные системы, композиционные материалы, свойства, формирование, аппроксимация

SYNTHESIS OF COMPOSITES: DATA PROCESSING

E.A. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov

Some topical issues of data processing in the design and operation of composite materials as complex systems are considered. Identification is considered as a process of generating knowledge necessary for the implementation of methods and algorithms of mathematics into practice. It is indicated that operational management consists of fragments of the global quality management task (criteria should be monitored). Most of the problems under consideration can be solved only on the interdisciplinary level (preferably each fragment of a local or global problem – within one discipline) with the preparation of the corresponding intellectual potential within various disciplinary scientific schools. A person has an absolute priority creating automated quality assessment systems using

parametric identification algorithms. Some representations of the processes of forming properties and their approximation are given.

Keywords: complex systems, composite materials, properties, formation, approximation

1. Системные методологии

Все еще остается актуальным создание наукоемких методологий для поиска решений трудных существенно нестандартных практических задач с трудно формализуемыми высокими требованиями к качеству прогнозирования и управления. В них основную роль играют системный подход к идентификации, фундаментальные исследования математических и вычислительных проблем управления, концептуальные аспекты идентификации и моделирования, совершенствование информационно-вычислительной среды. Любая методология включает поиск выбора текущего процесса идентификации. Содержанием математической теории структурной идентификации является математическое моделирование и исследование проблем локальных фрагментов без учета их реального контекста (их учет возможен при наличии отображения всего наглядного образа на дисциплинарный уровень при разработанных математических основах структурной идентификации). С проблемой структурной идентификации непосредственно связаны: переход от идеи к адекватной математической задаче; оценка достоверности результатов при использовании различных методов идентификации; локальная и глобальная идентифицируемость модели в пространстве состояний; автоматизация процессов структурной и параметрической идентификации; многомерный статистический контроль технологического процесса по регрессионным остаткам и др. Концепция структурной идентификации допускает наличие человеческого фактора. Интуиция, жизненный опыт и здравый смысл признаются в качестве основных инструментов субъекта структурной идентификации (доминирование творческих способностей человека над ценностью современного теоретического знания). Идентификация рассматривается как процесс порождения знания, необходимого для внедрения в практику методов и алгоритмов математики.

При управлении сложными системами наибольшая ответственность возникает при принятии решений плохо формализуемых объектов. К ним сложно применить аппарат математического программирования, построить математические модели объектов и т.д. Сама процедура принятия решения затрудняется сложной иерархией задач. Задачи оперативного управления являются лишь фрагментами глобальной задачи управления качеством; должны отслеживаться их критерии. Большинство из рассматриваемых задач можно решить лишь на междисциплинарном уровне (желательно каждый фрагмент локальной или глобальной задачи - в пределах одной дисциплины), что требует подготовки соответствующего интеллектуального потенциала внутри различных дисциплинарных научных школ. Попытки построения полностью автоматических систем управления качеством в большинстве случаев обречены на неудачу, поскольку человек имеет безусловный приоритет перед результатами анализа; любые попытки создания автоматизированных систем оценки качества с применением алгоритмов параметрической идентификации являются актуальными. Не исчезла актуальность и тиражирования эталонных прикладных разработок теории идентификации в различные отрасли промышленности.

2. Представление процессов функционирования систем

При проектировании и эксплуатации сложных систем (строительные материалы и строительные конструкции, эргатические системы и др.) широко используются различные представления процессов функционирования системы (высшие трансцендентные функции, математические методы планирования эксперимента, теория выбросов, потоки событий и т.д.). Так, переход из временной в частотную область осуществляется по преобразованию Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t}dt.$$

Функцию s(t) можно рассматривать как сумму бесконечного ряда гармонических

составляющих с амплитудами $\frac{\left|S(\omega)\right|}{\pi}d\omega$, непрерывно заполняющими интервал частот

от 0 до ∞ , и начальными фазами $\psi(\omega)$; представление $S(\omega)$ функции x(t) в частотной области позволяет легко установить ее физический смысл. Анализаторы спектров позволяют определить амплитуду и частоту спектральных компонент, входящих в состав анализируемого процесса. Основной характеристикой анализатора является разрешающая способность (наименьший интервал Δf по частоте между двумя спектральными линиями, которые ещё разделяются анализатором спектра. Анализатор позволяет получить не истинный спектр

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t}dt,$$

а его оценку (текущий спектр)

$$S_T(t_1,\omega) = \int_{t_1}^{t_1+T} x(t)e^{-j\omega t}dt;$$

истинный можно получить лишь тогда, когда анализируемое колебание x(t) периодично либо существует только в пределах интервала T. К сожалению, точность определения спектра связана со знанием непосредственно истинного спектра.

При
$$R(\tau) = \sum_{k=1}^{n} A_k e^{-c_k|\tau|}$$
 справедливо:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = 2\int_{0}^{\infty} R_{xx}(\tau) \cos \omega\tau d\tau = 2\sum_{k=1}^{n} A_{k} \int_{0}^{\infty} e^{-c_{k}|\tau|} \cos \omega\tau d\tau = 2\sum_{k=1}^{n} \frac{A_{k}c_{k}}{c_{k}^{2} + \omega^{2}}.$$

При
$$R(\tau) = A_0 e^{-c_0|\tau|} \cos \beta \tau + \sum_{k=1}^n A_k e^{-c_k|\tau|}$$
 имеем:

$$S_{xx}\left(\omega\right) = 2A_0 \int_0^\infty e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau \cos \omega \tau d\tau + 2\sum_{k=1}^n A_k \int_0^\infty e^{-c_k|\tau|} \cos \omega \tau d\tau.$$

После некоторых преобразований получим:

$$S_{xx}(\omega) = 2 \left[\sum_{k=1}^{n} \frac{A_k c_k}{c_k^2 + \omega 2} + A_0 c_0 \frac{\left(c_0^2 + b^2\right) + \omega^2}{\omega^4 + 2\left(c_0^2 - b^2\right)\omega^2 + \left(c_o^2 + b^2\right)^2} \right].$$

Выберем такое положительное число c , чтобы функция $e^{-c|\tau|}$ стремилась к нулю приблизительно с такой же скоростью, как и $R_{xx}(\tau)$; при $c_k=kc$ получим

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{k=1}^{n} A_k e^{-kc|\tau|}.$$

Для определения коэффициентов A_k воспользуемся представлением

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{k=1}^{n} B_{k} \varphi_{k}(\tau);$$

$$\varphi_{k}(\tau) = a_{k1} e^{-c|\tau|} + a_{k2} e^{-2c|\tau|} + \dots + a_{kk} e^{-kc|\tau|}.$$

Коэффициенты a_{ki} ($k \ge i$) определятся из условий

$$\int_{0}^{\infty} \varphi_{k}(\tau) \varphi_{i}(\tau) d\tau = 0, \ k \neq i \ ; \int_{0}^{\infty} \varphi_{k}^{2}(\tau) d\tau = 1.$$

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS Коэффициенты $B_{\it k}$ определятся из условия:

$$I = \int_{0}^{\infty} \left[R_{xx}(\tau) - \sum_{k=1}^{n} B_{k} \varphi_{k}(\tau) \right]^{2} d\tau = \min$$

(частные производные функционала по B_k равны нулю).

Во втором случае примем:

$$R_{xx}(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau); R_1(\tau) = A_0 e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau; R_2(\tau) = \sum_{k=1}^{n} A_0 e^{-c_k|\tau|}.$$

В первом приближении нами принималось:

$$R_{xx}(\tau) \approx R_1(\tau) = A_0 e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau.$$

При подборе значений коэффициентов использовались соотношения

$$A_0 = R(0), b = \frac{k\pi}{T_k}, c_o = \frac{b}{\pi} \ln \left| \frac{R(0)}{R(\tau_1)} \right|,$$

 $T_{\scriptscriptstyle k}$ — точка, в которой автокорреляционная функция ${\it k}$ -й раз пересекает ось абсцисс $(R(T_k) = 0), R(au_1)$ — значение первого отрицательного максимума автокорреляционной функции). Введя

$$R_2(\tau) = R_{xx}(\tau) - R_1(\tau) = R_{xx}(\tau) - A_0 e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau,$$

получим искомую аппроксимацию.

3. Аппроксимация кинетических процессов

При синтезе композитов в последнее время широко используются аналитические представления кинетических процессов формирования физико-механических характеристик композитов.

Процессы в гетерогенных системах обычно носят экспоненциальный характер $v = ae^{bx}$; идентифицируются с помощью регрессии приведением к виду

$$\lg y = \lg a + bx;$$

$$Y = A + bX$$
, $\lg y = Y$, $x = X$, $\lg a = A$.

Так, параметрическая идентификация таблично заданного кинетического процесса легко осуществляется зависимостью $y = ae^{bx} + c$.

X	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32	2,4
y	61,7	62,5	63	63,6	64,5	65	65,4	66,4
x	2,48	2,56	2,64	2,72	2,8	2,96	3,04	3,12
y	67.1	68,0	68,7	69.4	70,2	70,2	71.1	72,8
x	3,2	3,28	3,36	3,44	3,52	3,6	3,68	3,76
y	73,6	74,5	76,4	77,2	78,1	79,2	80,3	81,2
\boldsymbol{x}	3,84	3,92	4,0	4,08	4,16	4,24	4,32	4,4
У	82,2	83,3	84,4	85,4	86,5	87,8	89,1	90,1
\boldsymbol{x}	4,48	4,56	4,64	4,72	4,8	4,88	4,96	
У	91,3	92,5	93,8	95,1	96,4	97,8	98,7	

Непосредственные вычисления дают

$$y = 20e^{0.25x} + 3.$$

Аналогично производится идентификация процессов, которые имеют степенной характер. В ряде случаев используется и некоторая дополнительная информация. Так, при идентификации параметров a_0, a_1, a_2 процесса

$$y = a_0 + a_1 \lg \left(a_2 + x \right)$$

можно воспользоваться методом малых возмущений:

$$\Delta y = \frac{a_1}{a_2 - x} \Delta x = b \Delta x.$$

3десь коэффициент b идентифицируется с помощью линейной регрессии:

$$b = \frac{a_1}{a_2 - x} \, .$$

Использование высших частных производных (возмущения второго и последующих порядков) на практике обычно не имеет смысла: измерения, как правило, зашумлены; значимость производных мала. Для дисперсных систем используются и получаемые на основе интуитивных или теоретических соображений нелинейные аналитические модели. Так, для параметрической идентификации процесса

$$y = a_0 + a_1 x_1 x_2^3 + a_2 x_2 e^{-a_3 \frac{x_1^2}{x_3}} + \frac{a_4 x_4}{\sqrt{1 - a_5 x_5^2}},$$

введя

$$\xi_1 = x_1 x_2^3, \, \xi_2 = \frac{x_1^2}{x_3}, \, \xi_3 = x_2, \, \xi_4 = x_4, \, \xi_5 = x_5$$

и проведя линеаризацию в предположении малости приращений переменных, получим:

$$\Delta y = a_1 \Delta \xi_1 - a_2 a_3 \xi_3 e^{-a_3 \xi_2} \Delta \xi_2 + a_2 e^{-a_3 \xi_2} \Delta \xi_3 + \frac{a_4 \xi_4}{\sqrt{1 - a_5 \xi_5^2}} \Delta \xi_4 + \frac{a_4 a_5 \xi_4 \xi_5}{\sqrt{(1 - a_5 \xi_5^2)^3}} \Delta \xi_5 \, ;$$

$$\Delta y = b_1 \Delta \xi_1 - b_2 \Delta \xi_2 + b_3 \Delta \xi_3 + b_4 \Delta \xi_4 + b_5 \Delta \xi_5 = \sum_i b_i \Delta \xi_i .$$

Для идентификации a_0, a_1, a_2 можно воспользоваться методом линейной регрессии для статической задачи в случае системы с одним выходом:

$$X = a_0 + a_1 U_1 + \dots + a_m U_m.$$

По соотношению

$$b_5 = b_4 a_5 \xi_4 \xi_5$$

определится a_5 . Предполагается доступность измерений ξ_4 , ξ_5 . Подставляя выражения a_5 в b_4 , получим a_4 ; a_1 непосредственно определяется величиной b_1 ; a_2 , a_3 определятся по b_2 , b_3 ; $b_2 = -a_3\xi_3b_3$ (переменная ξ_3 доступна для измерения); a_2 – подстановкой a_3 в выражение для b_2 .

Приведенный подход к анализу и синтезу композитов прошел широкую положительную апробацию [1...3].

Список литературы

- 1. Garkina, I.A. Composite materials: identification, control, synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: materials science and engineering. 2019. Vol. 471. P. 032005.
- 2. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 8 (656). С. 28–33.
- 3. Гарькина, И.А. Краткий обзор аналитических методов синтеза сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. -2018. -№ 4 (37). -C. 48–54.

References

- 1. Garkina, I.A. Composite materials: identification, control, synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: materials science and engineering. 2019. Vol. 471. P. 032005.
- 2. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Proceedings of higher educational institutions. Building. − 2013. − №8 (656). − P. 28–33.
- 3. Garkina, I.A. A brief overview of analytical methods for the synthesis of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. $-2018. N_2 4 (37). P. 48-54$.

УДК 691.3

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Тараканов Олег Вячеславович,

доктор технических наук, профессор, декан факультета «Управление территориями»

E-mail: tarov60@mail.ru

Белякова Елена Александровна,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастр недвижимости и право» E-mail: var lena@mail.ru Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,

Doctor of Sciences, Professor,
Dean of the faculty «Territory Management»
E-mail: tarov60@mail.ru

Belyakova Elena Aleksandrovna,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Real estate cadastre and law»

E-mail: var lena@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ И СОСТАВ ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.В. Тараканов, Е.А. Белякова

Изучено влияние комплексных минеральных добавок на прочность традиционных цементно-песчаных растворов, а также микрокальцита на состав продуктов гидратации силикатных фаз цемента. Установлено, что кальцит способствует активации гидратации C_2S и образования гидросиликатов кальция. Определено, что скорость образования и структура формирующихся в цементных системах гидратных фаз во многом зависят от состояния поверхности, на которой они зарождаются, уровня пресыщения среды, температурных условий и многих других факторов. Установлено, что при использовании минеральных добавок в качестве микронаполнителей в цементных системах наиболее высокую эффективность показала бинарная смесь на основе кальцита и кремнеземсодержащего компонента (опоки). При анализе данных рентгенофазовых исследований выявлено положительное влияние кальцита на гидратацию цементного минерала C_2S .

Ключевые слова: комплексные минеральные добавки, прочность, продукты гидратации, цементно-минеральные композиции

THE INFLUENCE OF INTEGRATED MINERAL ADDITIVES ON THE STRENGTH AND COMPOSITION OF CEMENT MATERIALS HYDRATION

O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova

The influence of complex mineral additives on the strength of traditional cement-sand mortars, and the effect of microcalcite on the composition of the hydration products of the silicate phases of cement have been studied. It is found that calcite promotes activation of C₂S hydration and the formation of calcium hydrosilicates. It has been determined that the rate of formation and the structure of hydrated phases forming in cement systems largely depends on the state of the surface on which they originate, the level of saturation of the medium, temperature conditions and many other factors. It is found that using mineral additives as microfillers in cement systems, a binary mixture based on calcite and a silica-containing component (flask) shows the highest efficiency. When analyzing the data of X-ray phase studies, a positive effect of calcite on the hydration of the cement mineral C₂S is revealed.

Keywords: complex mineral additives, strength, hydration products, cement-mineral compositions

С каждым годом в России возрастает количество минеральных отходов, которые могут целенаправленно использоваться в строительном производстве. Масштабы использования отходов, образующихся на добывающих и перерабатывающих предприятиях, весьма скромны. В настоящее время только около 20 % применяется в качестве вторичного сырья, в том числе 10 % — в технологиях производства строительных материалов.

В огромной массе отходов значительное место занимают влажные осадки (шламы), образующиеся в результате реагентной обработки сточных вод предприятий различных отраслей промышленности. В результате сложных физико-химических процессов обработки промышленных стоков из воды выпадает агрегативно неустойчивый, склонный к коагуляции осадок, который с течением времени накапливается на полях фильтрации.

К сожалению, большинство шламовых отходов не находит применения и годами хранится на промышленных свалках и полигонах либо в дальнейшем утилизируется в специально подготовленных котлованах с последующей рекультивацией земель.

Вместе с тем шламовые отходы в зависимости от их химико-минералогического состава представляют собой ценное сырье для получения строительных и отделочных материалов различного назначения [1].

Одной из ведущих отраслей по количеству потребляемой воды является энергетическая промышленность, на предприятиях которой в результате химической очистки воды образуется огромное количество шламовых отходов, содержащих в качестве основного компонента карбонат кальция. Положительными свойствами подобного шлама являются его высокая дисперсность и стабильный химический состав. Известна классификация минеральных шламов и определены возможные области их применения в технологии строительных материалов [1-5]. Вместе с тем многие вопросы, касающиеся использования минеральных шламов, остаются недостаточно изученными и требуют более детальных исследований. К примеру, малоисследованной проблемой является изучение характера влияния смесей микронаполнителей различного минералогического состава на прочностные характеристики и микроструктуру цементных материалов.

В последние годы в теории и практике строительного материаловедения значительно возрос интерес к применению тонкодисперсных минеральных порошков (в том числе получаемых на основе карбонатных пород) в технологии бетонов нового поколения.

Основной целью применения подобных порошков является повышение эффективности использования современных гипер- и суперпластификаторов в бетоне, что позволяет значительно сокращать водосодержание бетонных смесей и существенно повышать прочность бетона [6-9].

Исследование влияния минеральных добавок на процессы начального структурообразования и состав продуктов гидратации, кинетику, твердение и прочность цементных материалов представляет научный и практический интерес, поскольку все большее количество цементных растворов и бетонов изготавливается с применением минеральных микронаполнителей и суперпластификаторов.

Интерес к использованию мокрых осадков (шламов) обусловлен тем, что многие из них представляют собой полиминеральные системы, которые предпочтительны при использовании в качестве микронаполнителей в цементных материалах по сравнению с однокомпонентными. Положительным фактором при использовании полиминеральных наполнителей является тот факт, что они в определенном смысле могут нивелировать негативные влияния некоторых компонентов, входящих в состав комплексной смеси. Например, совместное использование карбонатных шламов с тонкомолотым песком или другим силикатсодержащим компонентом способствует снижению негативного влияния силикатных материалов на пластификацию минеральных паст, а в присутствии цемента, кроме того, вследствие положительного влияния извести (выделяющейся при гидратации цемента), разжижение смешанных цементно-минеральных паст в присутствии СП становится еще более ощутимым.

Положительным фактором при использовании тонкодисперсных наполнителей в цементных системах является возможность заполнения пустот между крупными частицами песка и частицами цемента, что создает условия для наращивания гидратных фаз как на частицах цемента, так и на частицах микронаполнителя. Формирование кристаллизационных контактов в наполненных цементных системах приводит к повышению прочностных характеристик материала.

Задачей исследований явился анализ влияния комплексных минеральных добавок на прочность традиционных цементно-песчаных растворов, а также микрокальцита на состав продуктов гидратации силикатных фаз цемента.

С целью изучения характера влияния минеральных микронаполнителей на прочность цементных материалов была выполнена серия экспериментов по оценке прочности показателей цементно-песчаных растворов.

В качестве исследуемых наполнителей были приняты тонкодисперсный кальцит и плотная опока, размолотая до высокого значения показателя удельной поверхности $S_{\rm vn}=1000~{\rm m}^2/{\rm kr}$.

Результаты, представленные в таблице, свидетельствуют о том, что замена части кальцита на тонкодисперсную опоку приводит к значительному увеличению прочности образцов. Для отдельных видов бездобавочных цементов (вольский ПЦ 400 Д0) повышение прочности составов, содержащих 5 % кальцита и 5 % опоки, составляет более чем в 2 раза по сравнению с контрольными образцами.

Влияние минеральных микронаполнителей на прочность цементно-песчаных растворов

	Кол-во	Прочность при	г сжатии, МПа,	
Coorer	добавки,	через, сут		
Состав	% от массы	14	28	
	цемента			
Белгородский ПЦ 400 Д20	_	12,5	15,8	
цементно-песчаный раствор 1:3				
без добавки				
То же с добавкой	10	<u>18,9</u>	<u>21,3</u>	
тонкодисперсного кальцита		145	135	
То же с добавкой				
тонкодисперсного кальцита и	5	<u>18,7</u>	<u>26,7</u>	
плотной опоки	5	150	169	
Вольский ПЦ 400 Д0	_	16,7	20,4	
цементно-песчаный раствор 1:3				
без добавки				
То же с добавкой	10	<u>19,2</u>	<u>31,0</u>	
тонкодисперсного кальцита		115	152	
То же с добавкой				
тонкодисперсного кальцита и	5	<u>20,0</u>	<u>49,1</u>	
плотной опоки	5	120	241	
Пермский М400 Д20	_	16,9	27,5	
цементно-песчаный раствор 1:3				
без добавки				
То же с добавкой	10	<u>17,7</u>	<u>30,2</u>	
тонкодисперсного кальцита		105	110	
То же с добавкой				
тонкодисперсного кальцита и	5	<u>2,1</u>	<u>33,0</u>	
плотной опоки	5	131	120	

Следует отметить, что лишь для некоторых видов цементов при совместном использовании тонкодисперсного кальцита и кремнеземсодержащих минеральных доба-

вок отмечается резкое повышение прочности составов, в то время как для цементнопесчаных растворов, в которых в качестве микронаполнителя использовался только
кальцит, это не характерно. Подобное явление может быть объяснено высокой гидратационной активностью тонкодисперсной опоки, размещающейся между более крупными частицами цемента и песка. В результате этого в поверхностном слое частиц
микронаполнителя и цемента, содержащих активный кремнезем, при его взаимодействии с Ca(OH)₂ в зонах высокого пересыщения возможно зарождение субмикрокристаллов гидросиликатов кальция, сближенных до минимальных расстояний, а
также в пустотах между частицами.

Скорость образования и структура формирующихся в цементных системах гидратных фаз во многом зависит от состояния поверхности, на которой они зарождаются, уровня пресыщения среды, температурных условий и многих других факторов. В насыщенной среде на поверхности сформированных на ранней стадии гидратации микрокристаллов двумерные зародыши кристаллизации образуются и распадаются с одинаковой частотой, и те из них, которым удалось укрупниться, могут увеличивать размер или полностью разрушаться, определяя динамическое равновесие между поверхностью и средой. В момент создания пресыщения равновесие нарушается, кристаллы начинают зарождаться чаще, чем разрушаться, и укрепление кластеров преобладает над уменьшением их размера. На гранях сформированных кристаллов и вносимых в систему центров кристаллизации имеются активные зоны, на которых вероятность зарождения кристаллов значительно выше, чем на других участках. В результате флуктуаций и роста кластеров микрокристаллов ступени и выступы по их краям объединяются, и формируется система микровыступов, на которых происходит автономное зарождение новых микрокристаллов [10].

Подобная вероятная схема образования кристаллических веществ может иметь место в достаточно чистых системах.

При формировании микроструктуры цементных материалов кристаллизация новых фаз осложняется присутствием огромного количества примесей, гидратированных ионов, аквакомплексов и т.д. Молекулы примесей микрокомпонентов могут встраиваться в решётку преимущественно на периферии кластеров микрокристаллов, куда они поступают непосредственно из среды или из адсорбционного слоя. Примеси, которые отторгаются кристаллом, накапливаются в адсорбционном слое, откуда при определенных условиях они могут уходить в объем среды.

Очевидно, что в цементной системе, находящейся в вязкопластичном состоянии, на раннем этапе гидратации в условиях среды, насыщенной примесями и включениями, наиболее приспособленными к устойчивому формированию являются слоистые кристаллы АFm-фаз, в структуре которых основные октаэдрические слои чередуются с промежуточными слоями и которые могут содержать молекулы воды, а также катионы металлов и крупные анионы SO_4^{2-} , CO_3^{2-} и др. В этих условиях зарождение кристаллов АFm-фаз может происходить не только на поверхности цементных частиц, но и на поверхности зерен микронаполнителя. С большей вероятностью микрокристаллы гидроалюминатов кальция будут формироваться на подложке частиц микронаполнителей, структура элементарной кристаллической ячейки которых имеет параметры, близкие к структуре AFm-фаз. Этим условиям отвечают микрочастицы кальцита, вводимые в цементные системы в качестве микронаполнителя.

Таким образом, в цементных системах, наполненных тонкодисперсным кальцитом, в стесненных условиях при соприкосновении микрокристаллов AFm-фаз $CaCO_3$ и $Ca(OH)_2$ по малодефектным плоскостям возможно образование контактов срастания и прорастания. Этому способствует также изменяющаяся толщина слоев гидратов AFm-фаз. Образование подобных сложных микрокристаллов и дальнейшее их эпитаксиальное наращивание на затравках кристаллизации является одним из возможных механизмов повышения ранней прочности цементных систем, наполненных тонкодисперным кальцитом.

С целью определения характера влияния тонкодисперсного кальцита на состав продуктов гидратации силикатных минералов цемента была выполнена серия рентге-

нофазовых исследований на дифрактометре Дрон-3м в интервале брегговских углов от 4 до 80° . Исследования проводились с использованием медного анода с длиной волны λ =1,5418 Å и кобальтового анода с длиной волны λ =1,7902 Å. Добавка кальцита вводилась в C_2S с водой затворения в количестве 10% от массы вяжущего. После изготовления образцы твердели в нормальных условиях в течение 1,5 лет.

Результаты рентгенофазовых исследований, представленные на рис. 1 и 2, свидетельствуют о том, что характерным является увеличение относительной интенсивности отражений тоберморитового геля d=0,305 нм на рентгенограмме образцов с добавкой. Вместе с тем возрастает величина полуширины этих пиков (0,34 — для контрольного образца, 0,45 — для образца с добавкой тонкодисперсного кальцита), что косвенно свидетельствует о возможности искажений кристаллической решетки тоберморитоподобных гидросиликатов кальция, образующихся в присутствии шлама. Повышение прочности образцов β =C₂S с добавкой карбонатного шлама может быть объяснено активацией образования гидратов C-S-H (II). Характерное увеличение относительных интенсивностей этих гидросиликатов кальция (0,183 и 0,156 Å) отмечено на рентгенограммах C₂S с добавкой тонкодисперсного кальцита.

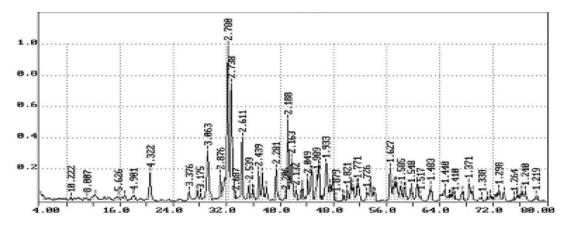


Рис. 1. Рентгенограмма C₂S без добавок (возраст 1,5 года)

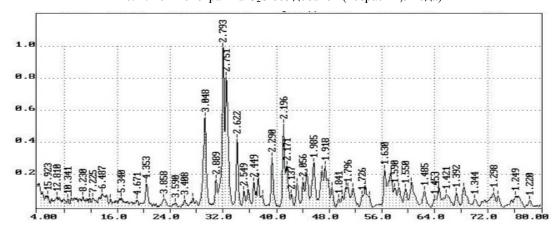


Рис. 2. Рентгенограмма C_2S с добавкой тонкодисперсного кальцита и C-3 (возраст 1,5 года)

Исследования, выполненные на кобальтовом излучении, также подтверждают факт увеличения относительных интенсивностей отражений, характерных для C-S-H (II). Однако, в целом, это увеличение несколько меньше, чем на рентгенограммах, полученных на медном излучении. О повышении степени гидратации C_2S в присутствии кальцита свидетельствует увеличение интенсивностей отражений $C_4(OH)_2$ (0,263; 0,193; 0,179; 0,169; 0,1485 и 0,145 нм) на рентгенограммах образцов с добавкой кальцита.

Для всех рентгенофазовых исследований, выполненных на различных излучениях, характерным является увеличение значений полуширины (B/2) и площади пиков (S_{Π}) для отражений гидратных фаз в присутствии добавки кальцита. Широкие и «размытые» отражения свидетельствуют о возможности внедрения ионов, поступающих в систему в составе кальцита, в пустоты и полости гидратов с формированием сложных напряженно-деформированных структур. Значения B/2 и S_{Π} для $Ca(OH)_2$ представлены в табл. 2.

 $\begin{tabular}{ll} T a б л и ц а 2 \\ $\mathsf{3}$ начения $\mathit{B}/2$ и S_Π на рентгенограммах C_2S \\ \end{tabular}$

d m.	Контрольн	ый состав	Состав с добавкой карбонатного шлама				
d, HM	B/2	S_{Π}	<i>B</i> /2	S_{Π}			
0,263	0,20	111	0,31	112			
0,193	0,30	53	0,44	120			
0,179	0,23	36	1,0	104			
0,169	0,13	17	0,57	33			
0,1485	0,33	43	0,54	47			
0,145	0,33	37	1,47	59			

Следует указать, что на рентгенограммах образцов с добавкой кальцита отмечается увеличение интенсивности отражений кальцита (0,248; 0,227; 0,2088; 0,1869; 0,1601; 0,152 нм).

Увеличение количества гидратной извести в цементных системах, наполненных кальцитом или другими карбонатными добавками, является положительным фактором при использовании совместно с кальцитом тонкодисперсных кремнеземсодержащих минеральных добавок (опоки, гранитной каменной муки и т.д.). В этом случае кальцит будет являться добавкой, активирующей гидратацию силикатных фаз и повышающей выход гидратной извести, которая может быть связана в гидратационные структуры, если в системе присутствует кремнеземсодержащий компонент. Прочность наполненных цементных материалов при этом будет значительно повышаться.

Таким образом, установлено, что при использовании минеральных добавок в качестве микронаполнителей в цементных системах наиболее высокую эффективность показала бинарная смесь на основе кальцита и кремнеземсодержащего компонента (опоки). При анализе данных рентгенофазовых исследований выявлено положительное влияние кальцита на гидратацию цементного минерала C_2S .

Список литературы

- 1. Коренькова, С.Ф. Основы и концепции утилизации химических осадков промстоков в стройиндустрии / С.Ф. Коренькова, Т.В. Шеина. Самара: Изд.-во Самарского государственного архитектурно-строительного университета, 2004. 208 с.
- 2. Шеина, Т.В. Функциональное назначение органоминеральных шламов в битумных композициях / Т.В. Шеина, С.Ф. Коренькова // Современные проблемы строительного материаловедения. Ч. 4. Ресурсо- и энергосберегающие технологии. Экологические, градостроительные и архитектурные аспекты строительного материаловедения / Международная научно-техническая конференция. Самара, 1995.
- 3. Сухов, Ю.В. Практическое использование шламов водоочистки в строительных растворах / Ю.В. Сухов, С.Ф. Коренькова, Т.В. Шеина // Актуальные проблемы ускорения строительного производства /45-я обл. НТК. Куйбышев, 1987.
- 4. Сухов, Ю.В. Заменитель извести в строительных растворах / Ю.В. Сухов, С.Ф. Коренькова, Т.В. Шеина // Строительные материалы. 1989. №1. С.14.
- 5. Тараканов, О.В. Гидратация и твердение цементных материалов с добавками минеральных шламов / О.В. Тараканов, Т.В. Пронина. Пенза: ПГУАС, 2006. 153 с.
- 6. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов. Ч. 1. Виды реологических матриц в бетонной смеси и стратегия повышения прочности

бетона и экономии его в конструкциях / В.И. Калашников // Строительные материалы XXI века. Технологии бетонов. -2007. -№5. - С. 8-10.

- 7. Калашников, В.И. Высокопрочные бетоны нового поколения / В.И. Калашников, И.В. Ерофеева // Science without borders. 2016. №20. С. 82–85.
- 8. Калашников, В.И. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов // Строительные материалы. 2017. Nel-2. C.62—67.
- 9. Ерофеев, В.Т. Исследование прочности композитов, наполненных порошками карбонатных пород / В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов, И.В. Ерофеева, С.А. Коротаев, Д.В. Емельянов, Э.М. Балатханова // Региональная архитектура и строительство. − 2018. №1(34). С. 5–13.
- 10. Мелихов, И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества / И.В. Мелихов. М.: БИНОМ, 2006. 309 с.

References

- 1. Korenkova, S.F. Fundamentals and concepts of utilization of chemical sludge from industrial waste in the construction industry / S.F. Korenkova, T.V. Sheina. Samara: Publishing house of the Samara State University of Architecture and Civil Engineering, $2004.-208\,\mathrm{p}$.
- 2. Sheina, T.V. Functional purpose of organomineral sludge in bitumen compositions / T.V. Sheina, S.F. Korenkova // Modern problems of building materials science. Part 4. Resource and energy saving technologies. Environmental, urban planning and architectural aspects of building materials science / International Scientific and Technical Conference. Samara, 1995.
- 3. Sukhov, Yu.V. Practical use of water treatment sludge in building solutions / Yu.V. Sukhov, S.F. Korenkova, T.V. Sheina // Actual problems of accelerating construction production / 45th reg. NTK. Kuibyshev, 1987.
- 4. Sukhov, Yu.V. Lime substitute in building solutions/ Yu.V. Sukhov, S.F. Korenkova, T.V. Sheina // Building materials. 1989. № 1. P. 14–20.
- 5. Tarakanov, O.V. Hydration and hardening of cement materials with additives of mineral slimes / O.V. Tarakanov, T.V. Pronina. Penza: PGUAS, 2006. 153 p.
- 6. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology into the future of concrete. P. 1. Types of rheological matrices in concrete mixture and the strategy of increasing the strength of concrete and saving its structures / V.I. Kalashnikov // Building materials of the XXI century. Concrete technology. -2007. $-N_{\odot}$ 5. -P. 8-10.
- 7. Kalashnikov, V.I. High-strength concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov, I.V. Erofeeva // Science without borders. -2016. $-N_{\odot}$ 20. -P. 82–85.
- 8. Kalashnikov, V.I. On the use of complex additives in new generation concretes / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov // Construction materials. 2017. №1–2. P.62-67.
- 9. Erofeev, V.T. Investigation of the strength of composites filled with carbonate rock powders / V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov, I.V. Erofeeva, S.A. Korotaev, D.V. Emelyanov, E.M. Balatkhanova // Regional architecture and engineering. − 2018. − № 1 (34). − P. 5–13.
- 10. Melikhov, I.V. Physicochemical evolution of solids / I.V. Melikhov. M.: BINOM, $2006. 309 \, \text{p}$.

УДК 691.5

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Логанина Валентина Ивановна,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Управление качеством и технология строительного производства» E-mail: loganin@mai.ru

Западно-Казахстанский аграрнотехнический университет им. Жангир хана» Западно-Казахстанская область, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51

Мажитов Еркебулан Бисенгалиевич,

старший преподаватель кафедры «Строительство и строительные материалы» E-mail: mazhitov201090@gmail.com

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Loganina Valentina Ivanovna,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department «Quality Management and Construction Technologies» E-mail: loganin@mai.ru West Kazakhstan Agrarian Technical University named after Zhangir Khan West Kazakhstan region, Uralsk, 51, Zhangir Khan St.

Mazhitov Erkebulan Bisengalievich,

Senior Lecturer of the department «Construction and Building Materials» E-mail: mazhitov201090@gmail.com

СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОЛИСИЛИКАТНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ЗОЛЬ-СИЛИКАТНЫХ КРАСОК

В.И. Логанина, Е.Б. Мажитов

Приведены сведения о прочности пленок на основе полисиликатного связующего. Методом нарушения полного внутреннего отражения и молибдатным методом установлено, что введение золя кремниевой кислоты в жидкое стекло способствует увеличению доли высокополимерных фракций кремнекислородных анионов. Выявлено, что пленки на основе полисиликатных растворов обладают более высокой прочностью при растяжении по сравнению с плёнками на основе жидких стекол. Установлена линейная зависимость между прочностью при растяжении плёнок на основе полисиликатного раствора и содержанием в нем высокополимерных фракций кремнекислородных анионов у-SiO₂, обусловленная увеличением числа силоксановых связей.

Ключевые слова: золь силикатная краска, прочность при растяжении, содержание высокополимерных фракций кремнекислородных анионов, математическая модель

COMPOSITION AND PROPERTIES OF POLISILICATE BINDER FOR SOL-SILICATE PAINTS

V.I. Loganina, E.B. Mazhitov

Information on the strength of films based on polysilicate binder is presented. By the method of breaking the total internal reflection and the molybdate method, it has been found that the introduction of a silica sol into water glass increases the proportion of high-polymer fractions of silicon-oxygen anions. It has been revealed that films based on polysilicate solutions have a higher tensile strength compared to films based on liquid glasses. A linear relationship has been established between the tensile strength of films based on a polysilicate solution and the content of high-polymer fractions of silicon-oxygen anions kpem-SiO2 in it, due to an increase in the number of siloxane bonds.

Keywords: sol silicate paint, tensile strength, content of high-polymer fractions of silicon-oxygen anions, mathematical model

Строительство и поддержание рабочего состояния зданий и сооружений требуют большого количества лакокрасочных составов [1]. Широкое применение в строи-

тельстве нашли силикатные краски [2–5]. Одним из недостатков покрытий на основе силикатных красок является их недостаточная трещиностойкость. Повышению стойкости силикатных покрытий способствует применение в качестве плёнкообразующего вещества полисиликатных растворов [6–8].

Нами разработан состав золь-силикатной краски на основе полисиликатного раствора, полученного смешением жидкого стекла и золя кремниевой кислоты [9–13]. Покрытия на основе золь-силикатной краски характеризуются ровной матовой поверхностью, декоративные и защитные свойства оцениваются как АД1 и АЗ1 [14]. Выявлено, что пленки на основе полисиликатных растворов обладают более высокой когезионной прочностью по сравнению с плёнками на основе жидких стекол (рис. 1). Определение когезионной прочности проводили по ГОСТ 18299-72* на разрывной машине ИР 5057-50. Метод основан на растяжении испытуемого образца свободной плёнки с определённой скоростью до разрыва. Скорость раздвижения зажимов машины соответствовала 1 мм/мин.

Установлено, что когезионная прочность плёнки на основе калиевого жидкого стекла составляет $R_{\rm p}$ =0,392 МПа, а прочность плёнки на основе полисиликатного связующего (15 % Nanosil 20) – 1,136 МПа.

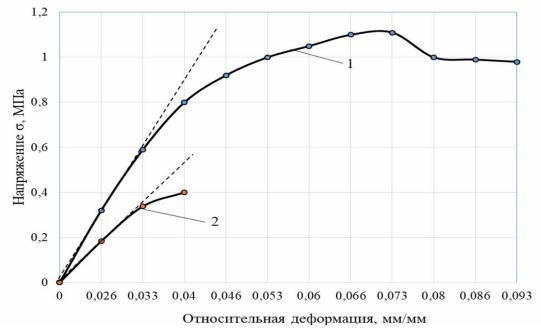


Рис. 1. Изменение относительной деформации при растяжении плёнок: 1 — на основе полисиликатного раствора; 2 — на основе жидкого стекла

Методом нарушения полного внутреннего отражения и молибдатным методом установлено, что полисиликатные растворы характеризуются повышенным содержанием высокополимерных фракций кремнекислородных анионов (см. таблицу, рис. 2).

Изменение коллоидно-химического состояния кремнезёма в зависимости от содержания золя кремниевой кислоты

Содержание золя	Общее содержание кремнезема SiO_2 , %	Содержание α -SiO ₂ + β -SiO ₂ , %	Содержание γ -SiO ₂ , %
0	21,9	19,38	2,51
5	26,21	18,61	7,6
10	30,39	17,71	12,68
15	34,93	15,00	19,93

С увеличением содержания золя доля полимерной формы кремнезема возрастает. Так, при введении золя кремниевой кислоты Nanosil 20 в количестве 5 % от массы жидкого стекла увеличивается содержание полимерной формы кремнезема γ -SiO₂ до

7,6 %, в количестве 15 % – до 19,93 %, в то время как в исходном составе (без добавки золя) – 2,51 %.

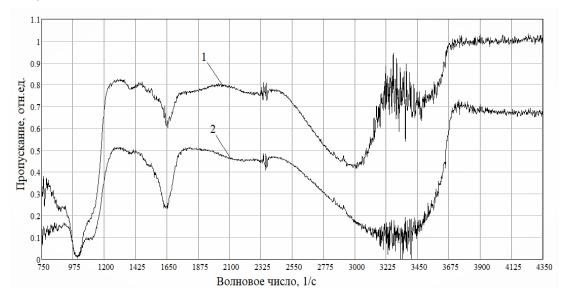


Рис. 2. ИК-спектры калиевого жидкого стекла (1) и калиевого полисиликатного раствора (2) с содержанием золя Nanosil 30 в количестве 15 %

Дополнительно для изучения состава полисиликатных растворов использовали метод нарушения полного внутреннего отражения, который позволяет исследовать образцы с высоким коэффициентом поглощения [15, 16].

Из рис. 2 видно, что исследуемый полисиликатный раствор имеет ряд характерных полос поглощения, которые в спектральном диапазоне 1000–1250 см⁻¹ отвечают колебаниями Si-O-Si связей. Углубление полосы 1095 см⁻¹ соответствует колебаниям Si-O-Si. Сдвиг полосы в область более высоких частот по сравнению с жидким стеклом (1082 см⁻¹) свидетельствует о большей степени полимеризации и увеличении числа силоксановых связей. Отражения в области 980–880 см⁻¹ характеризуют валентные колебания Si-(OH) гидроксилов.

Регистрируются полосы поглощения при 1064; 789 см⁻¹, которые соответствуют колебаниям связей Si-O и Si-O-Si.

Установлено, что между содержанием γ -SiO $_2$ в полисиликатном растворе и когезионной прочностью пленок существует линейная зависимость, заключающаяся в том, что при увеличении содержания кремнезёма в полимерной форме γ -SiO $_2$ наблюдается увеличение когезионной прочности пленок (рис. 3).

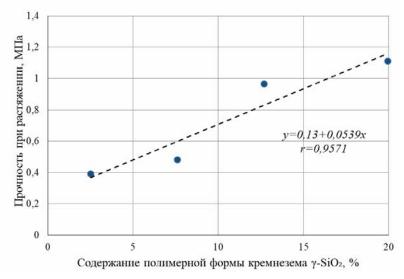


Рис. 3. Зависимость когезионной прочности плёнок на основе полисиликатного раствора от содержания кремниевой кислоты в полимерной форме γ -SiO₂

Повышение прочности, на наш взгляд, обусловлено увеличением силоксановых связей, наблюдаемым при анализе ИК-спектров полисиликатного раствора.

Получена математическая модель когезионной прочности пленок в зависимости от содержания полимерной формы кремнезема γ -SiO₂, которая имеет вид

$$y = 0.13 + 0.0539x$$
.

Коэффициент корреляции составляет r = 0.9571.

Список литературы

- 1. Жигарева, Г.В. Обзор рынка лакокрасочных материалов России: тенденции и перспективы / Г.В. Жигарева. URL: https://www.centrlack.ru/doc/zhigareva-280219.pdf
- 2. Корнеев, В.И. Жидкое и растворимое стекло / В.И. Корнеев, В.И. Данилов. СПб.: Стройиздат СПб, 1996. 216 с.
- 3. Агафонов, Г.И. Силикатные лакокрасочные материалы / Г.И. Агафонов, И.А. Безгузикова, Э.Ф. Ицко. М.: НИИТЭхим, 1989. 44 с.
- 4. Шинкарева, Е.В. Однокомпонентная фасадная краска на основе жидкого калиевого стекла производства ОАО «Домановский ПТК» / Е.В. Шинкарева // Лакокрасочные материалы и их применение. -2013. N = 6. C. 28-33.
- 5. Климанова, Е.А. Силикатные краски / Е.А. Климанова, Ю.А. Борщевский, И.Я. Жилкин. М.: Стройиздат, 1968. 86 с.
- 6. КАЙМАН: Золь-силикатная краска. URL: http://www.alligator.spb.ru/catalog/materialy-tm-kayman/zol-silikatnaya-kraska-tm-kayman.
- 7. Фиговский, О.Л. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых композиционных материалов / О.Л. Фиговский, П.Г. Кудрявцев // Инженерный вестник Дона. − 2014. − Т. 29, № 2. − С. 117.
 - 8. Айлер, Р. Химия кремнезема: в 2 т. / Р. Айлер. М.: Мир, 1982. 712 с.
- 9. Логанина, В.И. Полисиликатное связующее для силикатных красок / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. -2018. -№ 2. C. 39–45.
- 10. Логанина, В.И. Разработка рецептуры золь-силикатной краски / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. 2017. №3. C.51–53.
- 11. Логанина, В.И. Реологические свойства красок на основе полисиликатных растворов / В.И. Логанина, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. -2018. -№.1 C. 37–41.
- 12. Логанина, В.И. Свойства жидкого стекла с добавкой золя кремниевой кислоты / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Известия высших учебных заведений «Строительство». -2017. -№8. С. 74–79.
- 13. Логанина, В.И. Свойства модифицированного связующего для силикатных красок / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов, В.С. Демьянова // Региональная архитектура и строительство. 2017. №4. –С.17–23.
- 14. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христолюбов // Лакокрасочные материалы и их применение. -2004. −№ 8. C. 10–12.
- 15. Аверин, И.А. Особенности синтеза и исследования нанокомпозиционнных плёнок, полученных методом золь-гель технологии / И.А. Аверин, А.А. Карманов, Р.М. Печерская, И.А. Пронин // Известия вузов. Поволжский регион. Серия «Физикоматематические науки». -2012. № 2. -C.155−162.
- 16. Кесслер, И. Методы инфракрасной спектроскопии в химическом анализе / И. Кесслер.— М.: Наука, 1964.-224 с.

References

- 1. Zhigareva, G.V. Overview of the market of paints and varnishes in Russia: trends and prospects / G.V. Zhigareva. URL: https://www.centrlack.ru/doc/zhigareva-280219.pdf
- 2. Korneev, V.I. Liquid and soluble glass / V.I. Korneev, V.I. Danilov. SPb.: Stroyizdat SPb, 1996. 216 p.
- 3. Agafonov, G.I. Silicate paints and varnishes / G.I. Agafonov, I.A. Bezguzikova, E.F. Itsko. M.: NIITEKhim, 1989. 44 p.
- 4. Shinkareva, E.V. One-component facade paint based on liquid potassium glass produced by JSC «Domanovsky PTK» / E.V. Shinkareva // Paints and varnishes and their application. 2013. No. 6. P. 28–33.
- 5. Klimanova, E.A. Silicate paints / E.A. Klimanova, Yu.A. Borshchevsky, I.Ya. Zhilkin. M.: Stroyizdat, 1968. 86 p.
- 6. KAYMAN: Sol-silicate paint. URL: http://www.alligator.spb.ru/catalog/materialy-tm-kayman/zol-silikatnaya-kraska-tm-kayman.
- 7. Figovskiy, O.L. Liquid glass and aqueous solutions of silicates as a promising basis for technological processes for obtaining new composite materials / O.L. Figovskiy, P.G. Kudryavtsev // Engineering Bulletin of the Don. 2014. Vol. 29, No. 2. P. 117.
 - 8. Ayler, P. Chemistry of silica: In 2 vol. / P. Ayler. M.: Mir, 1982. 712 p.
- 9. Loganina, V.I. Polysilicate binder for silicate paints / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Bulletin of PNRPU. Construction and architecture. 2018. No. 2. P. 39–45.
- 10. Loganina, V.I. Development of the formulation of sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Regional architecture and construction. 2017. No. 3. P.51–53.
- 11. Loganina V.I. Rheological properties of paints based on polysilicate solutions / V.I. Loganina, E.B. Mazhitov // Regional architecture and construction. 2018. No. 1 P. 37–41.
- 12. Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Mazhitov E.B. Properties of liquid glass with the addition of silicic acid sol // Proceedings of higher educational institutions «Construction». 2017. No. 8. P. 74–79.
- 13. Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Mazhitov E.B., Demyanova V.S. Properties of the modified binder for silicate paints // Regional architecture and engineering. 2017. No. 4. P.17–23.
- 14. Loganina, V.I. Evaluation of decorative properties of paint and varnish coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paintwork materials and their application. 2004. No 8. P. 10–12.
- 15. Averin, I.A. Features of the synthesis and research of nanocomposite films obtained by the sol-gel technology / I.A. Averin, A.A. Karmanov, R.M. Pecherskaya, I.A. Pronin // Izvestiya vuzov. Volga region. Series «Physics and Mathematics». 2012. No. 2. P.155–162.
- 16. Kessler, I. Methods of infrared spectroscopy in chemical analysis / I. Kessler. M.: Nauka, 1964. 224 p.

УДК 691.5

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Логанина Валентина Ивановна,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Управление качеством и технология строительного производства» E-mail: loganin@mai.ru

Западно-Казахстанский аграрнотехнический университет им. Жангир хана» Западно-Казахстанская область, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51

Мажитов Еркебулан Бисенгалиевич,

старший преподаватель кафедры «Строительство и строительные материалы» E-mail: mazhitov201090@gmail.com

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Loganina Valentina Ivanovna,

Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Quality
Management and Construction Technologies»
E-mail: loganin@mai.ru

West Kazakhstan Agrarian Technical
University named after Thangir Khan

University named after Zhangir Khan West Kazakhstan region, Uralsk, 51, Zhangir Khan St.

Mazhitov Erkebulan Bisengalievich,

Senior Lecturer of the department «Construction and Building Materials» E-mail: mazhitov201090@gmail.com

ВЫБОР НАПОЛНИТЕЛЯ В РЕЦЕПТУРЕ ЗОЛЬ-СИЛИКАТНЫХ КРАСОК

В.И. Логанина, Е.Б. Мажитов

Рассчитаны значения критического поверхностного натяжения жидкости (растворы этанола с различным содержанием воды) на границе с твердым телом (различными наполнителями). Показано, что при применении в качестве наполнителя кальцита происходит усиление межчастичного взаимодействия. На основании проведенного исследования получены числовые значения постоянной Гамакера и критические значения поверхностного натяжения различных наполнителей, что позволяет выбрать оптимальный вид наполнителя.

Ключевые слова: золь-силикатная краска, наполнитель, критическое поверхностное натяжение, постоянная Гамакера, когезионная прочность

THE CHOICE OF A FILLER IN THE FORMULATION OF SOL-SILICATE PAINTS

V.I. Loganina, E.B. Mazhitov

The values of critical surface tension of a liquid (ethanol solutions with different water content) at the interface with a solid (different fillers) are calculated. It is shown that when calcite is used as a filler, the inter particle interaction is enhanced. Based on the study, the numerical values of the Hamaker constant and the critical value of the surface tension of various fillers have been obtained, so it is possible to choose an optimal type of a filler.

Keywords: sol-silicate paint, filler, critical surface tension, Hamaker constant, cohesive strength

Для отделки наружных и внутренних стен зданий широкое применение нашли силикатные краски. Учитывая возрастающие требования к качеству отделки и то, что покрытия на основе силикатных красок обладают недостаточной трещиностойкостью, актуальной является разработка способов модификации жидкого стекла, что позволит получить покрытия с более высокими защитными и декоративным свойствами. Анализ патентной и научно-технической литературы свидетельствует о перспективности использования в качестве пленкообразующего полисиликатных растворов, что обеспечивает более высокие эксплуатационные свойства покрытий [1–3].

При разработке золь-силикатной краски использовались золи кремниевой кислоты Nanosil 20 и Nanosil 30, жидкое стекло с силикатным модулем M=2,78-3,29. Полисиликатный раствор получали смешиванием жидкого стекла с золем кремниевой кислоты.

Так как поверхностные свойства частиц наполнителя будут оказывать важное влияние на физико-механические характеристики краски и покрытий на ее основе, выбор наполнителя осуществлялся на основании термодинамических критериев (критическое поверхностное натяжение, постоянная Гамакера) [4–7]. В качестве наполнителей применяли микрокальцит МК-2, микротальк МТ – ГШМ, маршалит марки «А». Значение поверхностного натяжения твердого тела (наполнителя) определяли с помощью критического поверхностного натяжения жидкости σ_{κ} на границе с твердым телом (метод Г.А. Зисмана) [8, 9]. Для этого получали зависимость $\cos\theta = f(\sigma_{\kappa})$ для различных жидкостей и, экстраполируя усредненную кривую $\cos\theta = f(\sigma_{\kappa})$ на $\cos\theta = 1$, определяли критическое значение поверхностного натяжения σ_{κ} , которое и является характеристикой поверхностной энергии единицы поверхности твердой фазы (наполнителя) [10, 11].

Энергию взаимодействия между частицами наполнителя оценивали по значению постоянной Гамакера, рассчитанной по уравнению

$$\cos\theta - 1 = \frac{A^*}{12h_{\min}\sigma_{x}},\tag{1}$$

где h_{\min} — наименьшая толщина плёнки, которая соответствует Ван-дер-Ваальсовому расстоянию (0,24нм); $\sigma_{\text{ж}}$ — поверхностное натяжение жидкости; A^{*} — сложная постоянная Гамакера при взаимодействии жидкости с твердым телом на границе с воздухом.

Для определения постоянной Гамакера строили графическую зависимость $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_x)$.

В качестве жидкости использовались растворы этанола с различным содержанием водной фракции. Угол смачивания поверхности наполнителя измеряли при температуре 20 °C на установке KRUSS Easy Drop, для чего были изготовлены образцы путем запрессовки соответствующего наполнителя при нагрузке 1,5 кПа в металлическую форму диаметром 10 мм.

Определение поверхностного натяжения жидкости проводили методом счета капель (сталагмометрический метод). Все эксперименты проводились при температуре 22±1 °C.

Работа адгезии связующего к наполнителю рассчитана в соответствии с термодинамическим уравнением Дюпре – Юнга [12, 13]

$$W_a = \sigma (1 + \cos \theta), \tag{2}$$

где W_a – работа адгезии; σ – поверхностное натяжение; θ – равновесный краевой угол смачивания.

Работа смачивания определялась соотношением

$$W_{\rm cm} = \sigma \cos \theta \,. \tag{3}$$

Результаты исследований показали, что для всех исследуемых образцов наблюдается линейная зависимость $\cos\theta = f(\sigma_x)$ (рис. 1).

Анализ данных, приведенных в табл. 1, свидетельствует, что микрокальцит имеет более высокое значение критического поверхностного натяжения, равное σ_{κ} =28,8 мH/м, по сравнению с остальными наполнителями. Значение постоянной Гамакера для микрокальцита составляет A=3,15·10⁻²⁰ Дж, что характеризует более сильное межчастичное взаимодействие в системе «микрокальцит – микрокальцит».

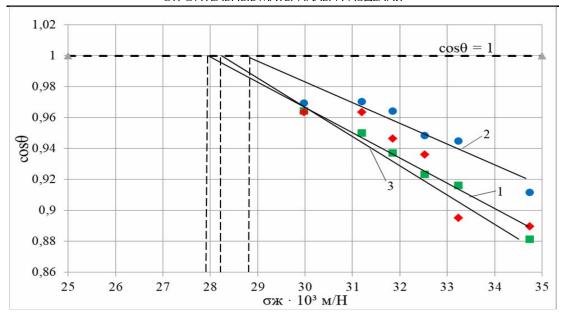


Рис. 1. Зависимость $\cos\theta = f(\sigma_{\pi})$: 1 — микротальк; 2 — микрокальцит; 3 — маршалит

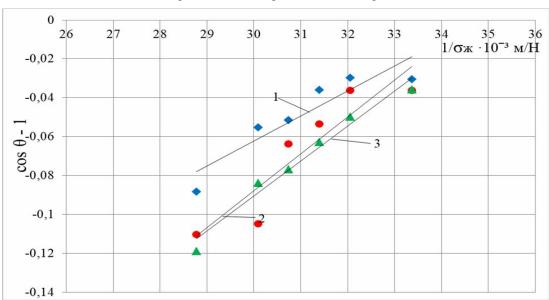


Рис.2. Функциональная зависимость $\cos\theta - 1 = f(1/\sigma_{x})$: 1 — микротальк; 2 — микрокальцит; 3 — маршалит

Таблица 1 Значения поверхностного натяжения наполнителей

Вид покрытия	Значение критического поверхностного натяжения наполнителя, мН/м	Значение постоянной Гамакера $A \cdot 10^{-20}$, Дж		
Микротальк	27,8	2,54		
Микрокальцит	28,8	3,15		
Маршалит	28,2	2,84		

В продолжение дальнейших исследований была определена прочность при растяжении покрытий. Предел прочности при растяжении (когезионную прочность) определяли по ГОСТ 18299-72* «Материалы лакокрасочные. Метод определения предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и модуля упругости» на разрывной машине ИР 5057-50. Метод основан на растяжении

испытуемого образца размером $0.7 \times 10 \times 50$ мм до разрыва при скорости деформирования 1 мм/мин. Образцы плёнок закрепляли в зажимах разрывной машины так, чтобы его продольная ось была расположена в направлении растяжения, а приложенные силы действовали равномерно по всему сечению образца. Испытания проводили при температуре воздуха $t=20\pm2$ °C и относительной влажности воздуха $\phi=65$ %.

Расчёт предела прочности при растяжении проводили по результатам испытания не менее пяти образцов каждого состава. Предел прочности при растяжении σ_p , МПа $(H/мм^2)$, для каждого образца вычисляли по формуле

$$\sigma_{p} = \frac{F_{Pi}}{S_{Oi}}, \tag{4}$$

где F_{Pi} – растягивающая нагрузка в момент разрыва, H; S_{Oi} – начальная площадь поперечного сечения образца, м².

В табл. 2 представлены значения прочности при растяжении покрытий в зависимости от вида наполнителя.

Таблица 2 Значения прочности при растяжении покрытий в зависимости от вида наполнителя

Наименование наполнителя	Прочность при растяжении покрытий, МПа
Микрокальцит	1,83
Микротальк	0,36
Маршалит	1,23

Установлено, что между значением постоянной Гамакера и прочностью при растяжении покрытий существует линейная зависимость (рис. 3). Получена математическая модель когезионной прочности в зависимости от значения постоянной Гамакера, которая имеет вид

$$\sigma_{3} = -5,72 + 2,41 \cdot 10^{20} x, \tag{5}$$

где x — постоянная Гамакера.

Коэффициент корреляции составляет R=0,9933. Таким образом, когезионная прочность покрытий в значительной степени обусловлена силой межчастичного взаимодействия «наполнитель — наполнитель» и может быть определена с помощью постоянной Гамакера.

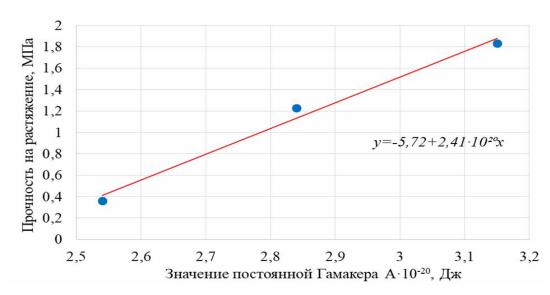


Рис. 3. Зависимость когезионной прочности покрытия от силы межчастичного взаимодействия «наполнитель – наполнитель» – постоянной Гамакера

В табл. 3 приведены значения работы адгезии и смачивания поверхности наполнителя калиевого полисиликатного раствора. Поверхностное натяжение калиевого полисиликатного раствора составило 59 мН/м.

Таблица 3 Влияние вида наполнителя на работу адгезии полисиликатного раствора

Наименование наполнителя	Угол смачивания, °С	Работа адгезии, мДж/м ²	Работа смачивания, мН/м	Коэффициент смачивания
Кальцит	47,2	99,08	40,09	0,839
Тальк	49,0	97,78	38,71	0,829
Маршалит	53,0	94,51	35,51	0,801

Анализ приведенных в табл. 3 данных свидетельствует, что значение работы адгезии полисиликатного раствора к наполнителям составляет 94,51–99,087 мДж/м². Выявить корреляцию между когезионной прочностью покрытий и работой адгезии связующего к наполнителю не удалось

Таким образом, когезионная прочность покрытий в значительной степени обусловлена силой межчастичного взаимодействия «наполнитель — наполнитель». Выбор наполнителя в числе других факторов должен быть обусловлен также и с применением критерия оценки силы межчастичного взаимодействия — постоянной Гамакера. Установлено, что применение в золь силикатных красках в качестве наполнителя кальцита способствует получению более высокой когезионной прочности покрытий, обусловленной увеличением вклада дисперсионных сил.

Разработана рецептура золь-силикатной краски, покрытия на основе которой характеризуются декоративной выразительностью, обладают ровной матовой поверхностью [14].

Список литературы

- 1. Логанина, В.И. Свойства модифицированного связующего для силикатных красок / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, В.С. Демьянова, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 4 (33). С. 17–23.
- 2. Логанина, В.И. Длительная прочность покрытий на основе золь-силикатной краски / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 877—884.
- 3. Логанина, В.И. Свойства жидкого стекла с добавкой золя кремниевой кислоты / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Известия высших учебных заведений. Строительство. -2017. -№ 8 (704). -C. 74–79.
- 4. Фролова, М.А. Применение термодинамического подхода к оценке энергетического состояния поверхности дисперсных материалов / М.А. Фролова, А.С. Тутыгин, А.М. Айзенштадт, Т.А. Махова, Т.А. Поспелова // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. − 2011. − Т. 3, № 6. − С. 13–25. − URL: http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild 6 2011.pdf (дата обращения 15.07.2013).
- 5. Вешнякова, Л.А. Оценка энергетического состояния сырья для получения строительных материалов / Л.А. Вешнякова, М.А. Фролова, А.М. Айзенштадт, В.С. Лесовик, О.Н. Михайлова, Т.А. Махова // Строительные материалы. − 2012. − № 10. C. 53–55
- 6. Фролова, М.А. Неразрушающий контроль качества бетонных строительных композитов / М.А. Фролова, А.С. Тутыгин, А.М. Айзенштадт, Т.А. Махова, В.С. Лесовик // Строительные материалы. -2012. −№ 3. C. 21–23.
- 7. Тищенко, А.И. Оценка прочности индивидуального контакта между твердыми структурными элементами лессовых оснований зданий массовой серийной застройки / А.И. Тищенко, И.А. Корнеев, М.Н. Агапов // Ползуновский вестник. 2007. № 1–2.
- 8. Дерягин, Б.Д. Смачивающие пленки / Б.Д. Дерягин, Н.В. Чураев. М.: Наука, $1984.-60~\mathrm{c}.$

- 9. Дерягин, Б.В. Молекулярное притяжение конденсированных тел / Б.В. Дерягин, И.И. Абрикосова, Е.М. Лифшиц // Успехи физических наук. 1958. Т. LXIV, вып. 3. С. 494–526.
- 10. Айзенштадт, А.М. Основы термодинамики высокодисперсных систем горных пород для строительных композитов (теория и практика) / А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, А.С. Тутыгин. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. 113 с.
- 11. Тутыгин, А.С. Физико-химия поверхности высокодисперсных систем / А.С. Тутыгин, А.М. Айзенштадт, Т.А. Дроздюк. Архангельск, 2017. 128 с.
 - 12. Волков, В.А. Коллоидная химия / В.А. Волков. М., 2001.
 - 13. Воюцкий, С.С. Курс коллоидной химии / С.С. Воюцкий. М., 1984. 573 с.
- 14. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христолюбов // Лакокрасочные материалы и их применение. -2004. −№ 8. -C. 10–12.

References

- 1. Loganina, V.I. Properties of the modified binder for silicate paints / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, V.S. Demyanova, E.B. Mazhitov // Regional architecture and engineering. 2017. No. 4 (33). P. 17–23.
- 2. Loganina, V.I. Long-term strength of coatings based on sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Vestnik MGSU. 2018. Vol. 13, No. 7 (118). P. 877–884.
- 3. Loganina, V.I. Properties of liquid glass with the addition of silicic acid sol / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // News of higher educational institutions. Building. 2017. No. 8 (704). P. 74–79.
- 4. Frolova, M.A. Application of the thermodynamic approach to assessing the energy state of the surface of dispersed materials / M.A. Frolova, A.S. Tutygin, A.M. Aizenshtadt, T.A. Makhova, T.A. Pospelova // Nanotechnologies in construction: a scientific Internet journal. 2011. Vol. 3, No. 6. P. 13–25. URL: http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild 6 2011.pdf (date of access 07.15.2013).
- 5. Veshnyakova, L.A. Assessment of the energy state of raw materials for obtaining building materials / L.A. Veshnyakova, M.A. Frolova, A.M. Aizenshtadt, V.S. Lesovik, O.N. Mikhailova, T.A. Makhova // Building materials. 2012. No 10. P. 53–55.
- 6. Frolova, M.A. Non-destructive quality control of concrete building composites / M.A. Frolova, A.S. Tutygin, A.M. Aizenshtadt, T.A. Makhova, V.S. Lesovik // Building materials. 2012. No 3. P. 21–23.
- 7. Tishchenko, A.I. Assessment of the strength of individual contact between solid structural elements of loess foundations of buildings of mass serial development / A.I. Tishchenko, I.A. Korneev, M.N. Agapov // Polzunovskii Vestnik. 2007. No. 1–2.
- 8. Deryagin, B.D. Wetting films / B.D. Deryagin, N.V. Churaev. M.: Nauka, 1984. 60 p.
- 9. Deryagin, B.V. Molecular attraction of condensed bodies / B.V. Deryagin, I.I. Abrikosova, E.M. Lifshits // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1958. Vol. LXIV, Issue 3. P. 494–526.
- 10. Aisenstadt, A.M. Fundamentals of thermodynamics of highly dispersed rock systems for building composites (theory and practice) / A.M. Aisenstadt, M.A. Frolova, A.S. Tutygin.– Arkhangelsk: IPC NArFU, 2013. 113 p.
- 11. Tutygin, A.S. Physicochemistry of the surface of highly dispersed systems / A.S. Tutygin, A.M., Aizenshtadt T.A. Drozdyuk. Arkhangelsk, 2017. 128 p.
 - 12. Volkov, V.A. Colloidal chemistry / V.A. Volkov. M., 2001.
 - 13. Voyutsky, S.S. Colloidal chemistry course / S.S. Voyutsky. M., 1984. 573 p.
- 14. Loganina, V.I. Evaluation of decorative properties of paint and varnish coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paintwork materials and their application. 2004. No. 8. P.10–12.

УДК 691.3

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Белякова Елена Александровна,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастр недвижимости и право» E-mail: var_lena@mail.ru

Москвин Роман Николаевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта»

E-mail: moskva in@mail.ru

Карташов Александр Александрович,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта»

E-mail: ak_29@mail.ru

Юрова Варвара Сергеевна,

аспирант

E-mail: var_lena@mail.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Belyakova Elena Aleksandrovna,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Real estate cadastre and law» E-mail: var_lena@mail.ru

Moskvin Roman Nikolaevich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Operation of Automobile Transport»

E-mail: moskva in@mail.ru

Kartashov Aleksandr Aleksandrovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Operation of Automobile Transport»

E-mail: ak_29@mail.ru

Yurova Varvara Sergeevna,

Post-graduate student E-mail: var_lena@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАКЦИОННО- И РЕОЛОГИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ ПОРОШКОВ ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД

Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин, А.А. Карташов, В.С. Юрова

Представлены результаты исследования основных физико-механических и технологических свойств бетонных смесей и бетонов на их основе. Изучены составы реакционно-порошковых и порошково-активированных бетонных смесей различной подвижности для производства бетонов как общестроительного назначения, так и высокопрочных классов. Исследованы реотехнологические характеристики пластифицированных суспензий из горных пород и зол-уноса ТЭЦ. Выявлено, что зола-унос ТЭЦ, подвергнутая особой механохимической активации, становится реакционно-химической универсальной добавкой. Она является и реологически-активной, и реакционно-активной, что позволит заменять дефицитный и дорогостоящий микрокремнезем. Установлено также, что активной пуццолановой добавкой в бетонах нового поколения, с успехом заменяющей микрокремнезем, является биокремнезем. В связи с этим были проведены исследования реотехнологических свойств реакционно-активированных бетонных смесей с такой добавкой, а также порошково-активированных песчаных бетонов нового поколения, в которых все наполнители и заполнители изготовлены из одного и того же материала – отсевов камнедробления гранита, что является чрезвычайно важным для всех горных карьеров нерудной промышленности.

Ключевые слова: современные бетоны, реакционно-активные и реологические добавки, тонкомолотые горные породы

MODERN CONCRETE USING REACTIVE AND RHEOLOGICALLY ACTIVE ROCK POWDERS

E.A. Belyakova, R.N. Moskvin, A.A. Kartashov, V.S. Yurova

The article is devoted to the study of the main physical, mechanical and technological properties of concrete mixes and concretes. Compositions of reaction-powder and powder-activated concrete mixtures of various mobility have been studied for concretes of general construction purposes and of

high-strength classes. The rheotechnological characteristics of plasticized suspensions from rocks and fly ash from thermal power plants have been investigated. It is revealed that fly ash from a thermal power plant, subjected to a special mechano-chemical activation, is a reaction-chemical universal additive. It is both rheologically active and reactive, which will make possible to replace scarce and expensive microsilica. It has been also revealed that an active pozzolanic additive in generation of new concretes, which successfully replaces microsilica, is biosilica. In this regard, studies of rheological properties of reaction-activated concrete mixtures with such an additive were carried out. Powder-activated sandy concrete of a new generation, in which all fillers and aggregates are made of the same material - screenings of stone crushing of granite, which is extremely important for all mining quarries of the nonmetallic industry, has also been investigated in the work.

Keywords: modern concretes, reaction and rheological additives, finely ground rocks

В последние десятилетия широкое распространение в мире получили суперпластифицированные порошково-активированные бетоны нового поколения, отличающиеся высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками. В таких бетонах одними из важнейших компонентов являются минеральные дисперсные наполнители, вводимые в бетон в большом количестве. Именно наличие таких наполнителей в сочетании с цементом и эффективными гиперпластификаторами позволяет экономить цемент, препятствует расслоению бетонной смеси, повышает ее реотехнологические свойства и увеличивает физико-механические характеристики [6].

До настоящего времени дисперсными минеральными наполнителями растворов и бетонов в основном являлись пылевидный кварц и некоторые другие породы, а реакционно-активной добавкой – микрокремнезем, который дорогостоящ и дефицитен.

В настоящее время в производстве строительных материалов наблюдается тенденция максимального замещения природного сырья техногенным, что объясняется необходимостью значительной экономии материальных и энергетических ресурсов.

Во многих регионах России, имеющих месторождения осадочных, вулканических и метаморфических горных пород, при разработке карьеров на щебень в отвалах остается большое количество отсевов камнедробления фракции менее 5,0 мм [5].

Кроме того, в большом количестве образуются отходы предприятий теплоэнергетики — золы-унос ТЭЦ. В связи с этим актуально изучение реологической и реакционной активности тонкодисперсных наполнителей из различных горных пород России, в частности молотых отсевов камнедробления или тонкодисперсных отходов горнорудной промышленности. Не менее актуально использование зол-уноса, которые по своим свойствам являются одновременно и реологически- и реакционно-активными добавками.

Цель работы — разработка составов реакционно-порошковых и порошково-активированных бетонных смесей различной подвижности для производства бетонов как общестроительного назначения классов прочности на сжатие B3,5-B50, так и высокопрочных классов прочности на сжатие B100-B120 с использованием реакционно- и реологически-активных порошков из горных пород и высокофункциональных по реологии и механизму реакционного действия механоактивированных зол-уноса от сжигания бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна.

В ходе выполнения работы применялись 4 серых портландцемента российских цементных заводов и 2 белых российского и датского производства; фракционированные кварцевые, формовочные и полевошпатовые пески. В качестве реакционно-активных пуццоланических добавок использовались микрокремнеземы и «Биокремнезем» — термоактивированный диатомит производства группы компаний «Diamix», г. Инза, Ульяновской области. В качестве тонкомолотых дисперсных реологически-активных минеральных добавок использовались горные породы: известняки, песчаники, гранит, диабаз, базальт, плотная опока; молотый кварц. В качестве реологически- и реакционно-активной добавки — золы-унос ТЭЦ [1]. Применялись пластифицирующие добавки на нафталиновой (С-3 и аналоги) и поликарбоксилатной основе (Хидетал и Melflux).

Первоначально были исследованы реотехнологические характеристики пластифицированных суспензий из горных пород и зол-уноса ТЭЦ. Реотехнологические свой-

ства горных пород и зол-уноса определялись по расплывам их суспензий на минивискозиметре Суттарда с тремя СП: Melflux 5581F, Хидетал 9γ и C-3 — при различных их концентрациях.

Из шести исследованных пород не пластифицируются наиболее эффективным ГП Melflux 5581F водные суспензии дисперсных кварца, песчаника и опоки (рис. 1). Реотехнологические эффекты в суспензиях доломитизированного известняка и гранита уступают цементным суспензиям на 7–23%, в зависимости от дозировки ГП. Опока и диатомит значительно блокируют действие гиперпластификатора при содержании их в смеси более 20–25% от массы цемента. Суспензии смесей цемента с гранитом при различном их соотношении имеют близкие значения реотехнологической эффективности. Оптимальная дозировка гиперпластификатора Melflux 5581F находится в диапазоне от 0,5 до 1,0% от массы смеси (рис. 2).

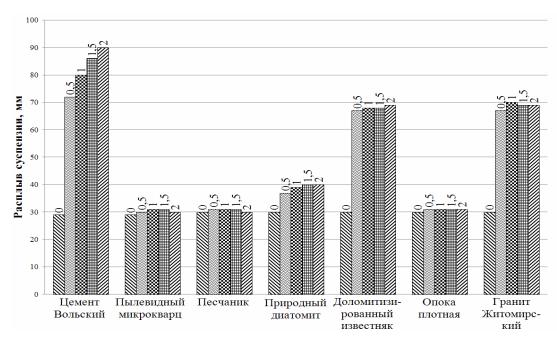


Рис. 1. Реограммы расплывов пластифицированных цементных и минеральных суспензий в зависимости от содержания гиперпластификатора Melflux 5581F

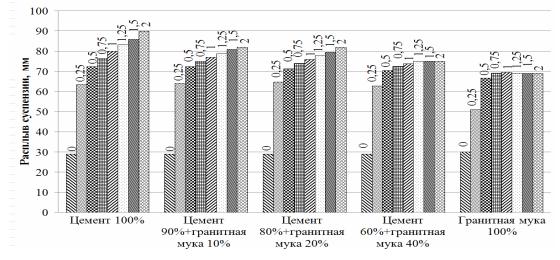


Рис. 2. Влияние дозировки гиперпластификатора Melflux 5581 F на реологические свойства цементно-гранитных суспензий

В свою очередь, для бетонов не менее важна реакционно-химическая функция наполнителя. Такая универсальная добавка, подвергнутая особой механохимической активации, выявлена нами из зол-уноса ТЭЦ от сжигания бурых углей Сибири [4]. Она

является и реологически-активной, и реакционно-активной, поэтому может заменить дефицитный и дорогостоящий микрокремнезем, и гидратационно-твердеющей, т.е. может заменить значительное количество цемента в композиционном цементно-зольном вяжущем [2, 3]. Результаты исследования влияния степени помола исходной золы на растекаемость пластифицированных зольно-водных суспензий приведены в табл. 1.

Повышение дисперсности с $S_{yд}$ =385 м²/кг до $S_{yд}$ =682 м²/кг, т.е. в 1,77 раза, вызывает увеличение водопотребности тонкомолотой золы на 33%. В то же время в пластифицированных суспензиях с возрастанием удельной поверхности происходит незначительное снижение водопотребности (рис. 3).

Таблица 1 Изменение растекаемости зольно-водных суспензий в зависимости от удельной поверхности золы-уноса

	V	7	Карактерист			
Время помола,	Удельная поверхность, измеренная	Без СП		Дозировка СП Хидетал 9ү 1% от массы золы		Водоредуцирующий эффект, <u>B/T</u>
4	на приборе ПСХ-9, м ² /кг	B/T	Расплыв, мм	В/Тпл	Расплыв, мм	В/Тпл
1	385	0,4 5	31	0,32	46	1,41
2	469	0,5	30	0,3	45	1,67
3	530	0,5 5	30	0,29	44	1,90
6	682	0,6	31	0,28	44	2,14

Испытания реологической активности золы как в исходном, так и в тонкомолотом виде показали, что последняя мало уступает портландцементу. Необходимо отметить, что в отличие от портландцемента высокие реологические свойства зольных суспензий обеспечиваются при минимальном количестве поликарбоксилатного гиперпластификатора.

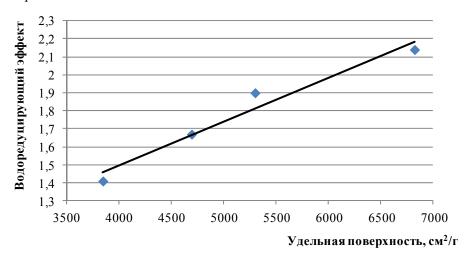


Рис. 3. Изменение водоредуцирующего эффекта в зависимости от степени помола исходной золы-уноса

Далее осуществлялась замена в порошково-активированных бетонах нового поколения пылевидного кварца и микрокремнезема дисперсными отходами горных пород от дробления и последующего помола. В табл. 2 представлены 16 оптимальных составов, выбранных из 80 предварительно изготовленных и изученных бетонов.

Таблица 2 Реотехнологические показатели реакционно-порошковых суспензионных бетонных смесей

№ п/п	Вид цемента, расход на 1 м ³ , кг	Вид каменной муки 50% от массы цемента	$\frac{\Pi_{\mathrm{T}}}{\mathrm{II}}$	<u>МК</u> Ц	В/Ц	$N_{ m BJ}^{\Pi_{ m T}}$	$PK_{_{X}}$, cm	C_{BJ}^{V} , %	ρ _{вл.} , кг/м ³	$R_{\rm cж}^{28}$, МПа
1	ЦД, 655	Известняк (Исса)	1,5	0,1; MK	0,361	1,629	30	61,7	2302	110,5
2	ЦД, 670	Доломит (Воронеж)	1,5	0,1; MK	0,363	1,636	34	61,8	2335	105,4
3	ЦД, 680	Доломит (Воронеж)	1,5	0,1; MK	0,328	1,516	33,5	60,1	2324	110,5
4	ЦБ, 683	Доломит (Воронеж)	1,5	0,1; MK	0,308	1,520	29	60,3	2328	113,1
5	ЦС, 670	Доломит (Воронеж)	1,5	0,1; MK	0,328	1,583	28	60,9	2304	102,9
6	ЦС, 678	Доломит (Воронеж)	1,5	0,1; MK	0,328	1,574	27	60,9	2307	109,7
7	ЦД, 668	Пылевидный кварц	1,5	0,1; БК	0,386	1,660	35,5	62,4	2289	103,7
8	ЦД, 681	Пылевидный кварц	1,5	0,1; БК	0,386	1,659	35,5	62,4	2333	113,9
9	ЦД, 592	Песчаник (Никольск)	1,5	0,1; MK	0,479	1,823	30	64,3	2095	85,0
10	ЦД, 664	Пылевидный кварц	1,5	0,1; MK	0,383	1,652	30	62,3	2296	113,9
11	ЦД, 669	Известняк (Тольятти)	1,5	0,1; MK	0,383	1,66	32	62,1	2318	115,6
12	ЦД, 657	Песчаник (Саловка)	1,5	0,1; MK	0,383	1,654	30	62,0	2234	103,7
13	ЦД, 660	Диабаз	1,5	0,1; MK	0,383	1,625	31	61,6	2305	107,1
14	ЦЩ, 664	Пылевидный кварц	1,5	0,1; БК	0,397	1,678	32	62,7	2253	105,4
15	ЦЩ, 690	Гранит	1,5	0,1; MK	0,347	1,590	32	61,4	2302	108,8
16	ЦЩ, 697	Известняк (Тольятти)	1,5	_	0,347	1,509	33	60,2	2331	112,2

П р и м е ч а н и е : ЦД – цемент белый СЕМ І 52,5 (Дания); ЦЩ – цемент белый ПЦ500 Д0 ОАО «Щуровский цемент»; ЦС – цемент ПЦ500 Д0 (г. Красноярск); МК – микрокремнезем марки МК-85; БК – биокремнезем (термоактивированный диатомит) ГК «DIAMIX».

Бетоны по прочностным показателям мало уступали составам с пылевидным кварцем с достижением прочности от 103 до 115 МПа, причем удельный расход цемента на единицу прочности составлял 6-7 кг/МПа.

Отмечены высокая саморастекаемость бетонных смесей, высокая плотность суспензионных бетонов, с содержанием суспензионной составляющей до 62%. Этот критерий является важным показателем для анализа топологической структуры таких бетонов.

Для сравнения был изготовлен состав бетонной смеси с использованием пылевидного кварца, липецкого микрокремнезема.

С целью замены активной пуццолановой добавки МК в бетонах нового поколения были проведены исследования реотехнологических свойств реакционно-активированных бетонных смесей с биокремнеземом, вводимым в сухом и суспензионном виде, составы 7 и 8 (см. табл. 2). Введение БК в виде суспензии в количестве 10% в пересчете на сухое вещество позволило повысить прочность до 114 МПа при сохранении высокой растекаемости.

Исключение из состава 11 (см. табл. 2) микрокремнезема потребовало увеличения расхода цемента на 28 кг/м^3 , уменьшения содержания воды на 9% для сохранения той же текучести. При этом прочность бетонных образцов без МК практически не изменилась (состав 16, табл. 2).

В работе исследованы порошково-активированные песчаные бетоны нового поколения, в которых все наполнители и заполнители изготовлены из одного и того же материала — отсевов камнедробления гранита фр. 0-5 мм, что является чрезвычайно важным для всех горных карьеров нерудной промышленности. Важно и то, что получены самоуплотняющиеся бетонные смеси с большими объемами суспензионной дисперсной и дисперсно-тонкозернистой составляющих и с прочностью бетонов более 100 МПа (составы ПАПБ-101 и ПАПБ-104, табл. 3).

Таблица 3 Гигрометрические и прочностные показатели образцов реакционно-порошкового и порошково-активированного песчаного и щебеночного бетонов

Обозна- чение состава	Ц, кг	Вид каменной муки	В/Т	В/Ц	ρ _{вл.} , кг/м ³	$C_{\mathrm{B,I}}^{V}$,	$R_{\rm cж}^{28}$, МПа	W_m^3 , % через 3 сут	$\epsilon_{ m yc}$, mm/m, uepes 180 cyt	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Реакционно-порошковые бетоны										
РПБ-2	655 ЦД	Известняк (Исса)	0,116	0,361	2302	61,7	110,5	2,11	0,34	
РПБ-7	670 ЦД	Доломит (Воронеж)	0,117	0,363	2335	61,8	105,4	2,11	0,36	
РПБ-19	680 ЦД	Доломит (Воронеж)	0,106	0,328	2324	60,1	110,5	2,92	0,31	
РПБ-23	683 ЦД	Доломит (Воронеж)	0,099	0,308	2328	60,3	113,1	2,19	0,27	
РПБ-43	670 ЦК	Доломит (Воронеж)	0,106	0,328	2304	60,9	102,9	2,38	0,31	
РПБ-44	678 ЦК	Доломит (Воронеж)	0,106	0,328	2307	60,9	109,7	2,32	0,28	
РПБ-51	681 ЦД	Пылевидный кварц	0,124	0,386	2333	62,4	103,7	2,94	0,39	
РПБ-53	681 ЦД	Пылевидный кварц	0,124	0,386	2289	62,1	113,9	2,84	0,37	
РПБ-57	677 ЦД	Песчаник (Никольск)	0,154	0,479	2095	64,3	85,0	5,89	0,80	
РПБ-63	664 ЦД	Пылевидный кварц	0,123	0,383	2296	62,3	113,9	2,34	0,38	
РПБ-64	669 ЦД	Известняк (Тольятти)	0,123	0,383	2318	62,1	113,9	2,97	0,35	
РПБ-65	657 ЦД	Песчаник (Саловка)	0,123	0,383	2234	62,0	103,7	2,69	0,42	
РПБ-66	660 ЦД	Диабаз	0,123	0,383	2305	61,6	107,1	2,81	0,32	
РПБ-73	664 ЦЩ	Пылевидный кварц	0,128	0,397	2253	62,7	105,4	2,70	0,35	
РПБ-80	690 ЦЩ	Гранит	0,115	0,347	2302	61,4	108,8	2,17	0,32	
РПБ-81	697 ЦЩ	Известняк (Тольятти)	0,115	0,347	2331	60,2	112,2	2,22	0,49	
		Песчаные б	етоны	без мик	крокрем	инезема	1			
ПАПБ-101	623 ЦЩ	Гранит	0,128	0,379	2296	57,5	107,2	1,69	0,36	
ПАПБ-104	643 ЦЩ	Мрамор	0,096	0,314	2303	55,8	105,4	1,76	0,42	
Щебеночные бетоны										
ПАЩБ-84	310 ЦН	Известняк (Тольятти)	0,064	0,496	2538	34,0	78,2	2,09	0,31	

						Око	нча	ние та	бл. 3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПАЩБ-85	295 ЦН	Известняк (Тольятти)	0,093	0,722	2464	38,1	40,8	3,36	0,35
ПАЩБ-89	300 ЦН	Известняк (Тольятти)	0,074	0,57	2445	34,3	68,0	2,47	0,28
ПАЩБ-90	247 ЦН	Известняк (Тольятти)	0,069	0,65	2404	31,4	52,7	2,61	0,35
ПАЩБ-91	300 ЦН	Известняк (Тольятти)	0,068	0,515	2451	31,1	90,1	2,37	0,24
ПАЩБ-112	294 ЦЧ	Известняк (Тольятти)	0,055	0,427	2369	31,2	54,4	2,41	0,28
ПАЩБ-113	450 ЦЧ	Известняк (Тольятти)	0,066	0,326	2370	39,7	97,8	2,89	0,24

Примечание:

ЦН – ПЦ500 Д0, ОАО «Новотроицкий цементный завод», Оренбургская область;

ЦЧ – ЦЕМ І 42,5Н, ЗАО «Катавский цемент», Челябинская область;

ЦЩ – ПЦ500 Д0 (белый), ОАО «Щуровский цемент», Московская область;

ЦД – ПЦ СЕМ І 52,5R (белый), AlborgWeit, Дания;

ЦК – ЦЕМ І 42,5H, ОАО «Красноярск».

Исследован и третий вид бетонов — малоцементный порошково-активированный щебеночный бетон с использованием известняковых дисперсных наполнителей. При расходах цемента $247-310~{\rm kr/m}^3$ получены бетоны с прочностью $53-98~{\rm M\Pi a}$ и удельным расходом цемента от 3,3 до 5,4 кг/МПа (см. табл. 3).

Бетонные смеси отличались в основном низкой подвижностью с осадкой конуса 4—8 см, и только два состава были изготовлены самоуплотняющимися. Коэффициенты объемной концентрации во всех составах находились в заданных оптимальных пределах $C_{\rm BД}^V$ =0,31÷0,4; $C_{\rm BДT}^V$ =0,45÷0,51 и $C_{\rm P}^V$ =0,63÷0,68.

Еще раз экспериментально доказано, что при использовании СП старого поколения нельзя получить самоуплотняющиеся бетонные смеси нового поколения.

Установленное оптимальное объемное содержание компонентов в реакционнопорошковых и порошково-активированных песчаных и щебеночных бетонах и кинетика нарастания прочности представлены на рис. 4.

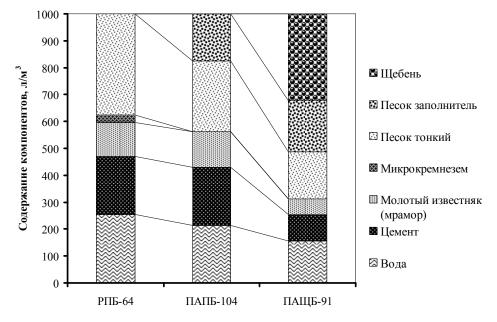


Рис. 4. Оптимальное объемное содержание компонентов в реакционно-порошковых и порошково-активированных песчаных и щебеночных бетонах

Из анализа результатов, представленных в табл. 3, следует, что водопоглощение и усадка всех видов бетонов с дисперсными наполнителями из горных пород за отдельным исключением не отличаются от водопоглощения и усадки состава с микрокварцем.

Таким образом, проведенные исследования показали, что высокодисперные порошки из горных пород, являющиеся наполнителями в бетонных смесях нового поколения, значительно улучшают физико-механические и реотехнологические свойства бетонных смесей и бетонов на их основе. Учитывая возможность максимального замещения природного сырья техногенным в производстве строительных материалов, можно добиться значительной экономии материальных и энергетических ресурсов. Выявлено, что не менее актуальным является использование зол-уноса, которые по своим свойствам являются одновременно и реологически- и реакционно-активными добавками, заменяющими дефицитный и дорогостоящий микрокремнезем, а также гидратационно-твердеющими, заменяющими значительное количество цемента в композиционном цементно-зольном вяжущем. Во всех составах отмечены высокая саморастекаемость бетонных смесей, высокая плотность суспензионных бетонов, что, в свою очередь, значительно повышает прочность бетонных композиций.

Список литературы

- 1. Калашников, В.И. Тепловыделение и реакционная активность зол-уноса в цементно-зольных вяжущих / В.И. Калашников, Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова, В.С. Белякова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2014. № 2 (10). С. 163—170.
- 2. Kalashnikov, V.I. Selecting the type of the control setting composite cement-ash binder / V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvin // Procedia Engineering. 2016. P. 1631–1635.
- 3. Белякова, Е.А. Цемент на основе золы-уноса для современных строительных технологий / Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин, О.В. Тараканов // Региональная архитектура и строительство. -2017. -№ 1 (30). -C. 5–11.
- 4. Белякова, Е.А. Золошлаковые отходы ТЭЦ и перспективы их утилизации / Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин, В.С. Белякова // Образование и наука в современном мире. Инновации. -2016. -№ 5. С. 151-157.
- 5. Калашников, С.В. Тонкозернистые реакционно-порошковые дисперсно-армированные бетоны с использованием горных пород: дис. ... канд. техн. наук / С.В. Калашников. Пенза, 2006. 163. с.
- 6. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов / В.И. Калашников // Технологии бетонов. 2007. №5. С. 8—10; 2007. №6. С. 8—11; 2008. №1. С. 22—26.

References

- 1. Kalashnikov, V.I. Heat release and reaction activity of fly ash in cement-ash binders / V.I. Kalashnikov, R.N. Moskvin, E.A. Belyakova, V.S. Belyakova // Models, systems, networks in economics, technology, nature and society. −2014. −№2 (10). −P. 163–170.
- 2. Kalashnikov, V.I. Selecting the type of the control setting composite cement-ash binder / V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvin // Procedia Engineering. 2016. P. 1631–1635.
- 3. Belyakova, E.A. Fly ash cement for modern building technologies / E.A. Belyakova, R.N. Moskvin, O.V. Tarakanov // Regional architecture and engineering. − 2017. − №1 (30). − P. 5–11.
- 4. Belyakova, E.A. Ash and slag waste from thermal power plants and prospects for their disposal / E.A. Belyakova, R.N. Moskvin, V.S. Belyakova // Education and Science in the Modern World. Innovation. -2016. $-\cancel{N}25$. $-\cancel{P}$. 151-157.

- 5. Kalashnikov S.V. Fine-grained reaction-powder dispersed-reinforced concrete using rocks: dis. ... cand. of sciences / S.V. Kalashnikov. Penza, 2006. 163. p.
- 6. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology to the future of concretes / V.I. Kalashnikov // Concrete Technologies. 2007. $N_{2}5$. P. 8–10; 2007. $N_{2}6$. P. 8–11; 2008. $N_{2}1$. P. 22–26.

УДК 519.87: 697.92

Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 18,

тел.: (383) 332-40-02; факс: (383) 332-28-47

Варенцов Валерий Константинович,

доктор технических наук, профессор E-mail:vvk@ngs.ru

Варенцова Валентина Ивановна,

кандидат химических наук, старший научный сотрудник

E-mail: vvk@ngs.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Кошев Александр Николаевич,

доктор химических наук, профессор, действительный член Нью-Йоркской академии наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»

E-mail: koshev@pguas.ru

Кузина Валентина Владимировна,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационновычислительные системы» E-mail: kuzina@pguas.ru Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Russia, 630128 Novosibirsk, 18, Kuateladze St.,

tel.: (383) 332-40-02; fax: (383) 332-28-47

Varentsov Valery Konstantinovich,

Doctor of Sciences, Professor

E-mail: vvk@ngs.ru

Varentsova Valentina Ivanovna,

Candidate of Chemical Sciences, research fellow

E-mail: vvk@ngs.ru.

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Koshev Alexander Nikolaevich.

Doctor of Chemistry Science, Professor, the full member of the New York Akademy of Sciences, Professor of the department «Information and computing systems» E-mail: koshev@pguas.ru

Kuzina Valentina Vladimirovna,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Information and computing systems»

É-mail: kuzina@pguas.ru

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.В. Кузина, В.И. Варенцова

Рассмотрены результаты исследований процессов электроосаждения металлов на электрохимически модифицированные углеродные волокнистые материалы экспериментальными методами и методами математического моделирования. Показана эффективность предварительной электрохимической модификации углеродных волокнистых материалов в индифферентных электролитах с целью создания композиционных и нанокомпозиционных материалов с новыми свойствами. Разработан комплекс программ на основе современных вычислительных методов, позволяющий рассчитывать распределение электрохимического процесса в электролизерах с УВМ с целью оптимизации процессов электроосаждения.

Ключевые слова: композиционные и нанокомпозиционные материалы, трехмерные углеродные материалы, электроосаждение металлов, оптимизация процессов и свойств

COMPOSITE AND NANOCOMPOSITE MATERIALS BASED ON CARBON FIBER MATERIALS: MODELING AND EXPERIMENT

V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.V. Kuzina, V.I. Varentsova

The results of studies of the processes of electrodeposition of metals on electrochemically modified carbon fiber materials by experimental methods and mathematical modeling methods are considered. The efficiency of preliminary electrochemical modification of carbon fiber materials in indifferent electrolytes in order to create composite and nanocomposite materials with new properties is shown. A set of programs based on modern computational methods has been developed that allows calculating the distribution of the electrochemical process in UVM electrolyzers in order to optimize the electrodeposition processes.

Keywords: composite and nanocomposite materials, three-dimensional carbon materials, metal electrodeposition, optimization of processes and properties

Углеродные волокнистые материалы (УВМ) широко используются для создания композиционных материалов в различных отраслях промышленности: авиационной, космической, машиностроительной, медицинской, химической и др. Наряду с этим УВМ применяются для электроизвлечения металлов из минерального и техногенного сырья, создания химических источников электрической энергии, суперконденсаторов, катализаторов, электродных материалов, обезвреживания токсичных соединений металлов в растворах [1–7]. Использование УВМ для перечисленных целей связано с осаждением на поверхность составляющих их волокон металлов, сплавов или их соединений. Одним из перспективных методов для этого является электрохимический, позволяющий управлять токовым и гидродинамическим режимами электролиза, составом электролита, конструкционным оформлением электродной системы [1–7].

Поверхность углеродных материалов (УМ) гидрофобна, поэтому необходимо обеспечение хорошей адгезии металла, сплава металлов или соединений металла с поверхностью углеродного материала. Для этого УМ подвергают предварительной обработке поверхностно-активными веществами, чаще всего окислительной обработке различными способами: высокотемпературным окислением в газовой среде, окислением в горячих растворах концентрированных кислот, различными окислителями: $K_2S_2O_8$, $K_2Cr_2O_7$ и др.

Перспективным методом модификации поверхностных свойств углеродных материалов, в том числе с целью улучшения их адгезионных свойств, является электрохимическая обработка в водных растворах электролитов [2–7]. В отличие от химических методов электрохимическая обработка осуществляется в неагрессивных растворах с низкой концентрацией реагентов, процессом можно управлять, изменяя условия электролиза и состав раствора.

Осаждение металлов на трехмерные УВМ может осуществляться в различных вариантах: сплошное покрытие волокон, мелкодисперсные осадки в виде островков макро- или наночастиц. При этом решаются задачи нанесения равномерного осадка металла или с определенным профилем по толщине материала. Эти задачи могут решаться чисто технологическими приемами, а также с использованием методов математического моделирования и оптимизации процессов осаждения металлов в проточном трехмерном электроде.

В данной статье рассмотрены результаты исследований процессов электроосаждения металлов на электрохимически модифицированные трехмерные углеродные материалы экспериментальными методами и методами математического моделирования с целью создания композиционных и нанокомпозиционных материалов.

Теоретические законы миграции и конвекции заряженных частиц в большинстве электрохимических систем описываются системами дифференциальных уравнений в частных производных следующего вида [3, 4]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \bullet (z_i u_i F C_i \nabla E + C_i v),$$

где z_i , C_i , u_i — соответственно заряд, концентрация и подвижность i-го электроактивного компонента в псевдогомогенной среде; ∇E — градиент потенциала электрического поля; v — вектор скорости конвективного переноса раствора; F — число Фарадея; $\nabla \bullet$ — дивергенция вектора.

В одномерном случае, наиболее часто реализующемся в рассматриваемых нами электрохимических системах, дивергенция вектора совпадает с производной, следовательно:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial \left(z_i u_i F C_i \nabla E + C_i v\right)}{\partial x}.$$

Преобразование данного уравнения в соответствии с существующими правилами и использование известных моделей, принятых в электрохимической кинетике [3, 4], в конечном счете приводят нас к следующей системе дифференциальных и алгебраических уравнений:

$$zF\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{\partial E}{\partial x} \frac{\rho_T \rho_G}{(\partial \rho_T / \partial x)(\rho_T + \rho_G)} + \frac{\rho_T \rho_G}{\rho_T + \rho_G} S_V j_S; \tag{1}$$

$$|v|zF\frac{\partial C}{\partial x} = -S_V j_S; \tag{2}$$

$$j_{S}(x) = j_{0} \frac{\exp\left[\alpha z F\left(E - \varphi_{R}\right)/RT\right] - \exp\left[\left(\alpha - 1\right)z F\left(E - \varphi_{R}\right)/RT\right]}{1 + j_{0} \exp\left[\alpha z F\left(E - \varphi_{R}\right)/RT\right]/z F K_{m}C};$$
(3)

$$C(0,\tau) = C_0; \quad C(x,0) = C_0; \quad \frac{\partial E}{\partial x}(0,t) = \rho_T j(t);$$

$$\frac{\partial E}{\partial x}(L,t) = \rho_G j(t); \quad E(x,0) = \varphi_R.$$
(4)

где j(t) – габаритная плотность тока в момент времени t; C_0 – концентрация металла на входе в электрод; ρ_T – удельное сопротивление твердой фазы; ρ_G – удельное сопротивление жидкой фазы; j_0 , α , ϕ_R – соответственно плотность тока обмена, коэффициент переноса и равновесный потенциал электрохимической реакции; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура процесса; K_m – коэффициент массопереноса.

В зависимости от целей и режимов нанесения металлического осадка на УВМ, некоторые электрохимические параметры процесса и системы могут быть зависимыми как от времени процесса, так и от координаты по толщине электрода [3, 4]. Особенно это касается величины удельного сопротивления твердой фазы (ρ_T) системы, то есть углеграфитового волокнистого материала. Необходимо рассматривать $\rho_T = \rho_T(x,t)$, так как удельное сопротивление УВМ формируется вначале в результате электрохимической обработки материала, а затем изменяется в процессе электролиза металла на УВМ. В силу названных причин в начальный момент времени и в процессе электросаждения металла на УВМ могут меняться и другие электрохимические параметры, такие, как удельная электродная поверхность, ток обмена и коэффициент переноса электрохимической реакции, пористость материала и пр. Методы расчета перечисленных динамических параметров разработаны нами и опубликованы, например, в монографиях [3, 4]. Описанные теоретические предположения подтверждены и экспериментальными исследованиями.

Экспериментальные исследования, касающиеся модификации УВМ, выполнены на тканых, нетканых и комбинированных углеродных материалах, различающихся удельной электропроводностью, реакционной поверхностью, пористостью [3–6]. Электрохимическую модификацию углеродных материалов осуществляли в растворах различных электролитов анодной поляризацией либо последовательно катодной – анодной поляризацией или их различной комбинацией. В результате электрохимической обработки возрастает количество поверхностных кислородсодержащих групп, обу-

словливающих гидрофильные свойства материала (см. таблицу). Предварительная электродная обработка углеродных материалов в растворах кислоты, щелочи или индифферентной соли [3, 5, 7] существенно влияет на адгезию осадка с поверхностью УМ, возможность последующего эффективного осаждения металла.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности волокон УВМ,
исходного и электрохимически обработанного в 0,25 М растворе серной кислоты

Исхо,	дный АНМ		$\mathbf{I}^{*)}$	$\Pi^{**)}$		
Элемент	Весовой %	Элемент	Весовой %	Элемент	Весовой %	
С	89,80	C	87,96	C	78,40	
О	8,99	О	10,28	О	19,11	
Na	0,40	Na	0,26	Na	0,35	
S	0,36	S	0,69	S	1,70	
Si	0,45	Si	0,81	Si	0,44	

 $I^{*)}$ Габаритная плотность тока -700 A/m^2 , катодная поляризация -20, анодная -10, катодная -20, анодная -10 мин.

 \mathbf{H}^{**}) Габаритная плотность тока — 500 А/м 2 , катодная поляризация — 10, анодная — 30 мин.

Многолетний опыт разработки технологических процессов электроизвлечения благородных и цветных металлов из промышленных растворов на УВМ [1–7] показал, что осаждение металлов на предварительно электрохимически не обработанные материалы часто приводит к непрочному сцеплению осадка с поверхностью УМ (рис. 1, а, б), изменяется морфология осадка металла (рис. 1, в, г).

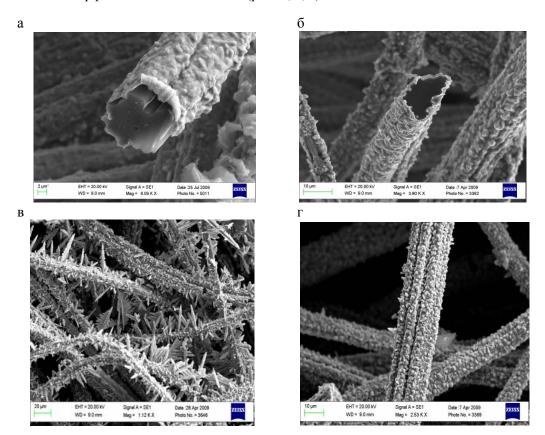
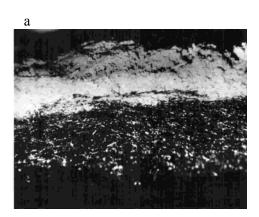


Рис. 1. Микрофотографии осадков металла на исходном (а) и электрохимически обработанном (б) УВМ; осадков меди на исходном (в) и электрохимически модифицированном (г) УВМ

Изменяется кинетика процесса восстановления не только ионов металла, но и ионов водорода. При этом улучшается сцепление осадка с поверхностью волокон, изменяются скорость осаждения металла (в 1,3–1,6 раза) и его выход по току (в 1,5–2,0 раза) [3, 7].

Аналогичные результаты были получены при электроосаждении серебра из сернокислых тиомочевинных, цианистых, железосинеродистых азотнокислых растворов, золота из цианистых, цитратно-фосфатных, сернокислых тиомочевинных, солянокислых растворов, палладия из азотнокислых, нитритно-нитратных, никеля из сернокислых растворов и других металлов на различные УВМ. Равномерность распределения осадка металла по толщине электрода, структура, морфология и состав осадков, следовательно, и свойства композиционного материала в значительной мере зависят от состояния поверхности волокон, условий электролиза, состава электролита, перенапряжения выделения водорода на осаждаемом металле (рис. 1–3) [3, 7].



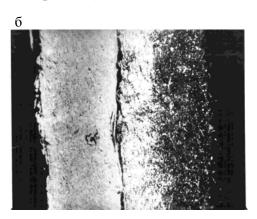


Рис. 2. Осадки цинка (а) на однослойном и серебра (б) на двухслойном УВМ

На рис. 3 приведены расчетные по математической модели (1)–(4) и экспериментальные данные исследования процессов совместного электроосаждения серебра из сернокислого тиомочевинного раствора состава: $H_2SO_4 - 0$, 5 моль/л, тиомочевина – $50 \, г/л$, серебро – $76 \, \text{мг/л}$ (рис. 3, а); серебро – $141 \, \text{мг/л}$ (рис. 3, б). Исследования проводились при фронтальной (со стороны противоэлектрода) подаче раствора в электрод. В первом случае электрод был составлен из 12 слоев УВМ, во втором – из 6 слоев. Характеристики УВМ (ВВП-66-95): удельная поверхность – $255 \, \text{см}^2/\text{см}^3$, удельная электропроводность – $0,03 \, \text{См/см}$, пористость – $0,95 \, [6, 7]$. Удельная электропроводность раствора – $0,1 \, \text{См/см}$, время электролиза – $60 \, \text{мин}$.

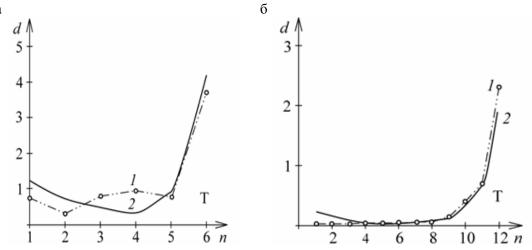


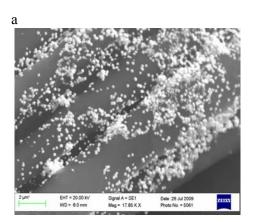
Рис. 3. Распределение осадка серебра по толщине электрода: d — отношение массы металла к массе УВМ; 1 — эксперимент; 2 — расчет; n — номер слоя; T — тыльная сторона электрода;

а — толщина электрода — 1 см; плотность тока — $0.2~{\rm A/m}^2$, скорость протока раствора — $0.56~{\rm cm/c}$; б — толщина электрода — $2~{\rm cm}$, плотность тока — $0.7~{\rm A/m}^2$, скорость протока раствора — $0.56~{\rm cm/c}$

Представленные на рис. 3 экспериментальные и расчетные зависимости, а также непротиворечивость рассчитанных распределений электрохимических функций классической электрохимической теории позволяют сделать вывод об эффективности

использования математических моделей и алгоритмов расчетов, описанных в данной статье и в других наших работах [1, 3 и др.], для проведения численных исследований процессов электроосаждения металлов из растворов переработки минерального и техногенного сырья, из промышленных сточных вод на проточные трехмерные электроды.

На поверхность волокон УВМ можно электролитически осаждать наноразмерные частички металлов или полностью «закрывать» поверхность волокон осадком различной толщины (рис. 4).



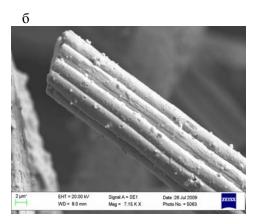


Рис. 4. Микрофотографии осадков платины на УВМ

Композиционные каталитические материалы на основе УВМ с осадками наноразмерных частичек платины, серебра или сплавов платины с серебром оказались не только более эффективными в каталитическом процессе (окисление алифатических спиртов и альдегидов, а также сложных минерально-органических конденсатов в водных растворах, окисление Се (III) в сернокислом растворе) [3, 7], но и более удобными при использовании их в различных конструкциях электрохимических реакторов по сравнению с активированным углем.

Выводы.

- 1. Приведены результаты исследований электроосаждения металлов на предварительно электрохимически модифицированные углеродные волокнистые материалы с целью получения на их основе композиционных материалов.
- 2. Предложено учитывать изменение характерных свойств модифицированных углеродных волокнистых материалов при математическом моделировании процессов электроосаждения металлов на УВМ с целью определения технологических параметров для повышения эффективности свойств композиционных и нанокомпозиционных материалов.
- 3. Предварительная электрохимическая модификация углеродных волокнистых материалов в индифферентных электролитах позволила получать композиционные и нанокомпозиционные материалы с хорошей адгезией электроосаждаемого металла с поверхностью волокон УМ.
- 4. С целью реализации математических моделей, используемых при расчетах электрохимических процессов в объеме и на поверхности УВМ, разработан комплекс программ на основе современных вычислительных методов и языков программирования.

Список литературы

- 1. Варенцов, В.К. Извлечение золота из трудновскрываемого арсено-пиритного гравиоконцентрата / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. № S3. C. 287–291.
- 2. Варенцов, В.К. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент:

- моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС, 2020.-172 с.
- 3. Варенцов, В.К. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова. Пенза: ПГУАС, 2015. 288 с.
- 4. Варенцов, В.К. Теоретические основы и моделирование электрохимических процессов в системах с проточными трехмерными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, И.Ф. Сухов, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС, 2014. 128 с.
- 5. Варенцов, В.К. Электролиз в растворах электролитов эффективный способ модификации свойств углеродных волокнистых материалов / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова // Химия в интересах устойчивого развития. 2000. № 3. С. 353–362.
- 6. Варенцов, В.К. Электролиз с проточными углеграфитовыми электродами в решении вопросов извлечения благородных металлов из отходов ювелирного производства / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова // Химия в интересах устойчивого развития. − 2004. − № 3. − С. 293–303.
- 7. Варенцов, В.К. Электроосаждение металлов и их оксидов на электрохимически модифицированные трехмерные углеродные материалы / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова // Физикохимия поверхности и защита материалов. − 2017. − Т. 53, № 6. − С. 616—622.

References

- 1. Varentsov, V.K. Extraction of gold from hard-to-open arsenic-pyrite gravity concentrate / V.K. Varentsov, V.I. Varentsova // Chemistry for Sustainable Development, 2019. No. S3. P. 287–291.
- 2. Varentsov, V.K. Redox processes on three-dimensional flow electrodes. Mathematical modeling. Theory. Experiment: monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova, V.V. Kuzina. Penza: PSUAC, 2020. 172 p.
- 3. Varentsov, V.K. Modern problems of electrolysis and problems of optimization of processes in reactors with three-dimensional carbon electrodes: monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova. Penza: PSUAC, 2015. 288 p.
- 4. Varentsov, V.K. Theoretical foundations and modeling of electrochemical processes in systems with three-dimensional flow electrodes: monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, I.F. Sukhov, V. V. Kuzina. Penza: PSUAC, 2014. 128 p.
- 5. Varentsov, V.K. Electrolysis in solutions of electrolytes an effective way to modify the properties of carbon fiber materials / V.K. Varentsov, V.I. Varentsova // Chemistry for Sustainable Development. 2000. No. 3. P. 353–362.
- 6. Varentsov, V.K. Electrolysis with flowing carbon-graphite electrodes in solving problems of extracting noble metals from jewelry waste / V.K. Varentsov, V.I. Varentsova // Chemistry for Sustainable Development. 2004. No. 3. P. 293–303.
- 7. Varentsov, V.K. Electrodeposition of metals and their oxides on electrochemically modified three-dimensional carbon materials / V.K. Varentsov, V.I. Varentsova // Physical chemistry of surfaces and protection of materials. 2017. Vol. 53, No. 6. P. 616–622.

УДК 691.5:666.9

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Хвастунов Виктор Леонтьевич,

доктор технических наук, профессор

E-mail: techbeton@pguas.ru

Хвастунов Алексей Викторович,

кандидат технических наук E-mail: alexey_pnz@mail.ru

Махамбетова Камажай Нурабуллаевна,

кандидат технических наук, доцент E-mail: knmakhambetova@gmail.com

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Khvastunov Victor Leontievich,

Doctor of Sciences, Professor E-mail: techbeton@pguas.ru

Khvastunov Aleksey Victorovich,

Doctor of Sciences, Professor E-mail: alexey_pnz@mail.ru

Makhambetova Kamagay N.,

Candidate of Sciences, Associate Professor E-mail: knmakhambetova@gmail.com

РЕАКЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ КАУСТИФИКАЦИИ И БРУСИТИЗАЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЕЗОБЖИГОВЫХ БЕСКЛИНКЕРНЫХ МИНЕРАЛЬНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУШИХ

В.Л. Хвастунов, А.В. Хвастунов, К.Н. Махамбетова

Рассмотрены ресурсосберегающие технологии безобжиговых малоэнергоемких материалов на основе активизированных щелочью, содой и поташом композиций из молотого гранулированного доменного шлака и измельченных горных пород (глин, известняков, гравелитов, песчаников и др.). Установлено влияние активизирующих добавок и их количества как в отдельности, так и в комплексе с пластифицирующими добавками (ЛСТ – лигносульфонат технический, С-3 – суперпластификатор) на снижение водопотребности и прочностные характеристики виброуплотненных и прессованных глиношлаковых, карбонатно-шлаковых, карбонатно-цементных вяжущих.

Ключевые слова: шлак, цемент, щелочь, сода, поташ, суперпластификатор, глина, известняк, минерально-шлаковое вяжущее, карбонатно-цементное вяжущее, водосодержание, прочность

REACTIONARY PROCESSES OF CAUSTIFICATION AND BRUSITIZATION IN THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF NON-FIRING CLINKERLESS MINERAL-SLAG BINDERS

V.L. Khvastunov, A.V. Khvastunov, K.N. Makhambetova

The article considers resource-saving technologies of non-fired low-energy materials based on compositions of ground granulated blast-furnace slag and crushed rocks (clays, limestones, gravelites, sandstones, etc.) activated by alkali, soda and potash. The role of activating additives and their amount, both individually and in combination with plasticizing additives (LST – technical lignosulfonate, C-3 – superplasticizer) in reducing water demand and strength characteristics of vibrocompacted and pressed clay-slag, carbonate-slag, carbonate-cement binders has been established.

Keywords: slag, cement, alkali, soda, potash, superplasticizer, clay, limestone, mineral-slag binder, carbonate-cement binder, water content, strength

Стратегия развития строительного комплекса РФ предполагает, что четверть объема всех производимых материалов различного назначения должна быть обеспечена за счет рационального использования отходов и местных материалов.

Разработка ресурсосберегающих технологий строительных материалов и конструкций на их основе с ориентацией на эффективные безобжиговые вяжущие и местные источники сырья для их производства является актуальной задачей и требует разрешения во всех регионах РФ.

Повсеместно распространенное местное сырьё в виде глин, карбонатных пород, песчаников, гравелитов и др., наличие в стране огромных запасов техногенных отходов (зол, шлаков, шламов) являются большим стимулом их использования в композитных материалах для различных видов строительства. Практика показала, что обжиговый энергоемкий цемент не всегда рационально используется в производстве строительных материалов; необходимо также учитывать огромный выброс CO_2 в атмосферу при его производстве и связанные с этим негативные процессы в окружающей среде.

В [1–5, 7–11] показано, что отвержденные щелочью NaOH глины, песчаники, гравелиты и другие горные породы в сочетании с доменным гранулированным шлаком обладают комплексом высокоэффективных свойств, позволяющих их использовать в виде как конструкционно-теплоизоляционных, так и конструкционных материалов для жилищного строительства (стеновые блоки, бордюрный камень, тротуарная плитка, армированные оконные перемычки и др.).

Известно, что при добыче карбонатных пород для различных видов производств образуется до 30-35 % и более отсевов камнедробления, в которых содержится около 40 % тонкодисперсных частиц.

Химический и химико-минералогический состав шлаков, известняков, глин и портландцементов приведен в табл. 1.

Таблица 1 Химический и химико-минералогический состав шлаков, известняков, глин и портландцементов

			Содержание основных оксидов и соединений, %										
№ п/п	Наиме- нование компонентов	CaO	MgO	SiO_2	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	FeO	CaCO ₃	${\sf MgCO}_3$	Нерастворимый остаток в НСІ	S	SO_3	п.п.п.
1	Шлак Липецкий гранули- рованный	40,5	9,37	38,1	9,52	-	0,52	-	-	-	0,65	1	-
2	Доломити-	41,62	7,39	-	0,07	0,43	-	74,08	15,44	8,48		0,12	41,11
	зированный	44,53	4,99	-	0,12	0,61	-	10,43	10,43	8,28		0,12	40,78
	известняк	42,83	6,54	-	0,12	0,47	-	13,67	13,67	8,74		•	41,04
	Иссинского	42,35	6,88	-	0,11	0,47	-	14,38	14,38	8,60		0,14	41,13
	карьера Пензенской области	43,56	5,33	ı	0,23	0,45	1	11,14	11,14	9,20		1	40,57
3	Глины	1,33	0,60	69,07	16,42	3,12	_		_			0,06	8,60
	карьеров	1,44	0,30	79,65	6,21	3,91	_	-	_	-		-	8,00
	Пензенской	1,70	1,60	71,50	14,70	4,40	-	_	_	-		0,10	5,50
	области	10,59		61,75	10,48	3,84	-	-	-	-		-	11,20
	(Иссинская,	10,00	1,20	01,70	10,.0	2,0.							11,20
	Долгору-												
	ковская,												
	Нижнело-												
	мовская, Ля-												
	гушевская)												

									Оког	нчани	те т	аб	л. 1
	Химико-минералогический состав портландцементов												
4	Портандцемент	C_3S	C_2S	C_3A	C ₄ AF	MgO							
	ЦЕМ I 42,5H	63,88	10,87	4,62	14,99	1,37	-	-	-	-	-	-	-
	(г.Вольск,												
	Саратовская												
	область)												
5	Портандцемент	61,99	17,05	6,7	11,42	1,18	-	-	-	-	-	2,49	-
	ЦЕМ І 42,5Н												
	(ООО «Азия												
	Цемент»)												
6	Осколцемент	CaO	SiO ₂	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na ₂ O	SO_3	П.П.П.	C_3S	C_2S	C_3A	C ₄ AF
	ПЦ 500Д0						+						
							K ₂ O						
		65,3	21,2	5,7	4,3	1,4	1,02	0,2	1,6	57,6	17,4	7,9	13,1

Кристаллографическая и химическая природа, формы кристаллов, двойников и друз карбонатных пород, содержащих кальцит, доломит и другие разновидности карбонатов, предопределяет перспективную возможность их сочетания с цементом и гранулированным доменным шлаком с образованием твердеющих структур (рис. 1). Сингония кальцита и доломита – тригональная.

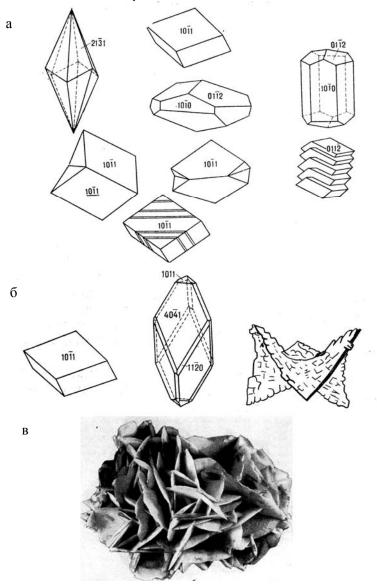


Рис.1. Кристаллы (а), двойники (б) и друзы карбонатов (в) со структурой кальцита

Согласно [12] минералы со структурой кальцита (см. рис. 1) часто выделяются в виде хорошо образованных кристаллов, основными формами которых являются различные ромбоэдры, скаленоэдры, призмы и их комбинации.

Известны эпитаксиальные нарастания кальцита на доломит, доломита на кальцит, доломита на родохрозит и сидерит, характеризующиеся параллельным расположением кристаллографических осей индивидов.

Кальцит часто встречается в очень хороших кристаллах (рис. 1,а), число простых форм в которых доходит до 700. Их морфология имеет ярко выраженный типоморфный характер и зависит от условий образования. Смена форм хорошо фиксируется на зональных кристаллах. Известны разнообразные кальцитовые друзы (рис.1,в) и нарастания, параллельные срастания, двойники (см. рис.1,а).

Доломит образует хорошо огранённые кристаллы ромбоэдрического габитуса, грани кристаллов часто искривлены и (или) имеют блочно-мозаичное строение. В отличие от кальцита для доломита характерны ромбоэдры (1011), обычно с седлообразно изогнутыми гранями (рис. 1,б). Также встречаются сферокристаллы, сферолиты, крупно-, мелко- и скрытокристаллические зернистые (часто пористые), почковидносферолитовые, ячеистые агрегаты и прожилки. Иногда в виде оолитовых скоплений.

Исходя из того, что минералы кальцита и доломита располагают четко выраженной кристаллографической индивидуальностью, отличаются существованием нескольких сотен габитусов (наружный вид кристалла) кристаллов кальцита и доломита, их высокой поверхностной реакционной активностью, высказано предположение о возможности эпитаксиального и синтаксического срастания продуктов гидратации шлака с поверхностью карбонатных частиц при формировании прочности и предпочтительности использования карбонатов в смешанных безобжиговых бесклинкерных вяжущих [9].

Установлено [4, 5, 7], что доменные молотые основные шлаки с удельной поверхностью S_{yz} =300 м²/кг и безобжиговые композиции на их основе, например, с использованием кальцита без введения щелочного активизатора твердеют медленно при нормальных условиях. В исследованиях определена длительность индукционного периода для различных шлаков в зависимости от водошлакового (В/Ш) отношения, температуры твердения, тонкости помола [1, 7–11].

Опираясь на достаточную изученность активизаторов щелочного отверждения шлакощелочных [6] и минерально-шлаковых вяжущих [7-9], мы обратили внимание на отдельные факты более высокого прочностного эффекта отверждения шлаков щелочными солями, например содой Na₂CO₃ и поташом K₂CO₃, по сравнению со щелочами NaOH и KOH. Принимая во внимание тот факт, что карбонаты и фосфаты по силе действия на некоторые шлаковые стекла превосходят растворы гидрооксидов, а также практические сведения о более высокой активизирующей функции растворов соды и поташа при отверждении шлаковых стекол по сравнению со щелочью и жидким стеклом, мы установили [7-11], что это проявление «содового парадокса» первого рода, когда растворимость шлаковых стекол в растворах карбонатных солей Na₂CO₃ и K₂CO₃ выше, чем в едких щелочах равной нормальности, или «содового парадокса» второго рода, связанного с более сильным синергетическим действием смеси растворов карбоната и гидрооксида Na или K по сравнению с действием растворов этих веществ, взятых в отдельности. Также было отмечено, что для шлаков наличие гидролизной извести усиливает действие этих двух «парадоксов» за счет каустификации и образования дополнительной щелочи в объеме бетона, т.е. известь интенсивно извлекается из шлаковых стекол для активного реакционного процесса [7–11].

При использовании в качестве щелочного активизатора соды или поташа реакционные процессы связаны прежде всего с реакцией каустификации их гидролизной известью, выделяемой при гидратации шлака, регенерирующей щелочь. Твердение шлака при этом осуществляется за счет воздействия на него регенерируемых щелочей (рис. 2).

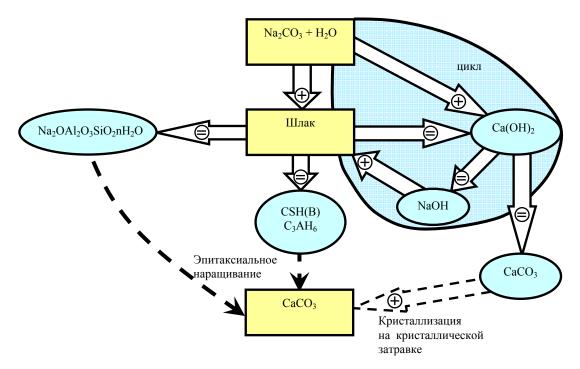


Рис. 2. Реакционный процесс каустификации соды гидролизной известью и эпитаксиальное наращивание продуктов гидратации шлака на гранях кристаллов кальцита

Процессы каустификации проходят достаточно быстро и ускоряются, если в композиционное вяжущее вводится свободный $Ca(OH)_2$ или композиционное вяжущее содержит доломитизированный известняк. В этом случае (рис. 3) установлено два реакционных цикла. Первый связан с воздействием исходной щелочи на шлак, а второй — с воздействием регенерируемой щелочи на углекислый магний $MgCO_3$ с образованием соды, которая каустифицируется гидролизной известью и превращается в щелочь.

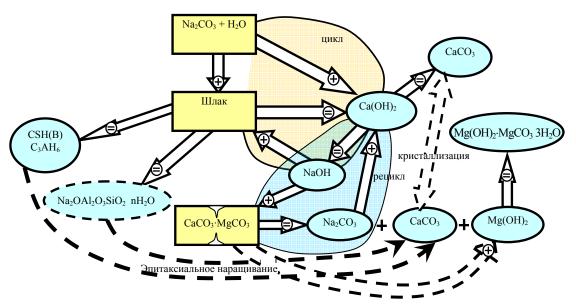


Рис. 3. Реакционный процесс активации шлака содой, каустификации соды гидролизной известью с регенерацией щелочи, бруситизации магнезита при наличии доломита в известняке:

— исходные вещества;
— продукты реакции;

— акт получения продуктов

При формировании состава композиционных вяжущих и изделий на основе шлака, горной породы и активизатора твердения обращено внимание на то, что в них доля шлака, исходя из необходимости возрастающей степени наполнения шлака горной породой, постоянно уменьшается. При использовании индифферентной к щелочам горной породы (кальцитовый известняк, мрамор, барит и др.) уменьшение содержания шлака при одной и той же дозировке щелочи от массы смешанного вяжущего равносильно повышению содержания щелочи, приходящейся на шлак и взаимодействующей с ним. Так, например, в смешанном вяжущем при соотношении шлак:порода=1:1 и дозировке щелочи в количестве 3 % от массы смеси на шлак приходится 6 % щелочи, а при соотношении шлак:порода=1:4 при дозировке щелочи 2 % на шлак приходится уже 10 %, т.е. доля щелочи $C_{\rm m}$, приходящаяся на шлак в композиционном вяжущем, может быть вычислена из условия дозировки щелочи на композиционное вяжущем, может быть вычислена из условия дозировки щелочи на композиционное вяжущее 2 % к массовой части наполнителя $m_{\rm H}$ по формуле $C_{\rm m} = 2(1+m_{\rm H})$.

Также известно, что согласно формуле pH =
$$-\lg \frac{4\cdot 10^{-14} \left(B/\coprod\right)}{\Pi}$$
 [9] с понижением

водошлакового (В/Ш) отношения при неизменном содержании NaOH молярность (ионная сила) и рH раствора возрастают.

Согласно вышеприведенной формуле при B/Ш=0,1, т.е. в полусухих смесях, для достижения высокой молярности раствора и pH=14 необходимо лишь 1-1,5 % NaOH от массы шлака, в то время как в пластичных системах при B/Ш=0,5 дозировка щелочи должна составлять 4-8 %.

Исследованиями по твердению композиций на основе шлака и щелочи [3–5, 9–10] установлено, что высокое значение рН среды затворения является необходимым условием активного гидролиза кремне- и алюмокислородных связей и выщелачивания их с поверхности шлакового стекла, что непосредственно связано с выделением гидролизной извести и влиянием её на формирование конденсационно-кристаллизационной структуры. В связи с этим по методике [3] было изучено влияние концентрации NaOH на выделение гидролизной извести из шлаков, определяющей начальное структурообразование шлаковых вяжущих.

Результаты полученных данных представлены в табл. 2.

Таблица 2 Содержание гидролизной извести СаО (г/л) в суспензиях шлаков в присутствии NaOH после выдержки

Концентрация NaOH, моль/л	Содержание гидролизной СаО в присутствии NaOH при перо 10 минут	-
0	0,077	0,140
0,01	0,035	-
0,1	0,039	0,032
1,0	0,060	0,043
2,0	0,140	0,070
5,0	0,046	0,024

Было установлено, что выделение гидролизной извести из шлака носит аномальный характер в зависимости от концентрации щелочи NaOH. Это объясняется тем, что гидравлическая активность шлаков зависит от их минералогического и химического состава и соотношения кристаллической и стекловидной фаз.

С целью выявления особенностей взаимодействия доломитизированного известняка со шлаком и щелочью был проведен рентгенофазовый анализ известняка и активизированного минерально-шлакового вяжущего на его основе, который осуществлялся на дифрактометре ДРОН-3М с трубкой БСВ-27IIIСИ. Длина волны рентгеновского излучения – 1,5418 А; напряжение – 40 кВт; ток анода – 40 мА; щели: Соллера №1 – 4 mm; №2 – 0,25 mm, №4 – 6 mm; диапазон скорости счета 1/100 имп/с; постоянная времени -2,5; скорость вращения счетчика -1 град/мин; шаг метки -1 град; скорость диаграммной ленты -720 мм/ч; съемка с вращением образца. Обработка и поиск фаз на дифрактограмме проводились по программе «ОРФА». Результаты рентгенофазового анализа представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 4, a,6.

Таблица 3 Результаты рентгенофазового анализа доломитизированного известняка Иссинского карьера

2θ	d	J, %	2θ	d	J, %	2θ	d	J, %
23,20	3,8338	6	43,35	2,1342	13	56,80	1,6208	3
29,55	3,0229	100	45,05	2,0123	3	57,60	1,6002	3
30,98	2,8865	78	47,68	1,9073	10	59,85	1,5453	2
36,10	2,4880	13	48,70	1,8697	12	60,90	1,5212	2
39,60	2,2758	10	50,45	1,8089	2			
41,20	2,1910	8	51,10	1,7874	3			

Таблица 4 Результаты рентгенофазового анализа минерально-шлакового вяжущего (К:Ш=40:60)

2θ	d	J, %	2θ	d	J, %	2θ	d	J, %
23,15	3,8420	13	39,60	2,2758	19	52,60	1,7399	3
29,55	3,0229	100	43,35	2,0872	13	57,50	1,6027	4
31,00	2,8847	28	47,75	1,9047	11	64,90	1,4367	2
36,10	2,4880	9	48,80	1,8661	13	70,60	1,3341	2

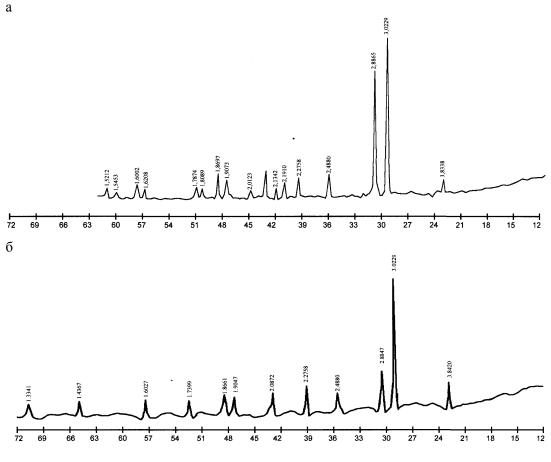


Рис. 4. Рентгенограммы доломитизированного известняка (a) и минерально-шлакового вяжущего на его основе (б)

Nº4

В образце (см. рис. 4,б) вяжущее на основе доломитизированного известняка по сравнению с образцом (см. рис. 4,а — доломитизированный известняк) отмечается снижение интенсивности линии доломита (2,8847 Å) с 78 до 28 % (см. табл. 3, 4), что свидетельствует о расходовании доломита на реакцию со щелочью NaOH и образование рентгеноаморфного брусита.

Качественный анализ, подтверждающий образование брусита, проводили по методике Н.А. Тананаева [13].

Рентгеноаморфные новообразования были проанализированы химическими методами (брусит, кремнекислота, гидролизная известь и др.).

Качественный анализ наличия кремниевой кислоты в отверждающих системах на основе шлака, горных пород и щелочи основывался на предположении о том, что при добавлении разбавленных кислот к растворам силикатов выделяется белый студенистый осадок кремниевой кислоты. Согласно исследованиям [13] установлено, что наиболее полно протекает реакция образования осадка кремниевой кислоты при добавлении к хлористоводородному раствору силикатов хлорида аммония, который способствует коагуляции H_2SiO_3 . Испытываемый раствор выпаривали досуха, остаток переносили на фильтровальную бумагу и обливали 5-% уксусно-кислым раствором красителя метиленового голубого. После обработки холодной водой остается студенистый осадок кремниевой кислоты, окрашенный метиленовым голубым в синий цвет.

Быстрое затвердевание активизированных вяжущих на основе карбонатных пород и шлака происходит с добавкой извести в количестве 2-3 %. Установлено [7, 8], что прочностные показатели карбонатно-шлаковых материалов на кальците и доломитизированном известняке с малыми добавками щелочи или соды (2-3 %) выше по сравнению с более высокими (5 %), что подтверждает ранее приведенные данные о более полном связывании соды гидролизной известью и правильность выдвинутого нами принципа минимизации расхода щелочных активизаторов NaOH и Na₂CO₃ непосредственно в композиционных материалах на основе шлака и доломитизированной карбонатной породы [9].

При водном и щелочном затворении шлаков их индукционный период резко сокращается со снижением водошлакового отношения, с повышением дисперсности шлаков, с увеличением температуры синтеза цементирующих компонентов. Значительного снижения водошлакового отношения в минерально-шлаковых композициях можно добиться введением суперпластификаторов С-3 и лигносульфоната технического (ЛСТ) [9–11].

Основной целью экспериментальных исследований является подтверждение рассмотренных выше теоретических предпосылок повышения эффективности активизированных минерально-шлаковых вяжущих, выявление количественного влияния активизаторов твердения (сода, щелочь, поташ) и пластифицирующих добавок (С-3 и ЛСТ) на водоредуцирование и механические свойства минерально-шлаковых вяжущих, обоснование рекомендаций по практическому использованию безобжиговых бесклинкерных минерально-шлаковых вяжущих и бетонов на их основе.

Предварительные эксперименты показали, что карбонатные породы (известняк, доломит) вследствие особой кристаллографической структуры, разнообразия габитусов кристаллов (см. рис. 1) и адсорбирующей способности органических веществ являются высокоселективными веществами в паре с С-3 и ЛСТ. Даже при дисперсности S_{ya} = 1000 см²/г уровень водопонижения в карбонатно-шлаковых композициях достигает более чем двухкратного значения. В качестве исходных материалов для проведения экспериментальных исследований использовали измельченную глину Долгоруковского месторождения Пензенской области с удельной поверхностью по прибору ПСХ-2 3500 см²/г, молотый гранулированный шлак Новолипецкого металлургического завода с удельной поверхностью 3500 см²/г, молотый доломитизированный известняк Иссинского карьера Пензенской области с удельной поверхностью 3200 см²/г, цемент М500 Старооскольского завода (см. табл. 1), активизирующие добавки щелочи NаOH, соды Nа₂CO₃, поташа K_2 CO₃, пластифицирующие добавки — суперпластификатор (С-3) и лигносульфонат технический (ЛСТ). Для исследований изготавливались

образцы-кубы с ребром 30 мм методом виброуплотнения на виброплощадке в течение 20 с с частотой колебаний 2800 в минуту, а также методом силового прессования при давлении 15 МПа. Влияние пластифицирующих добавок на водосодержание дисперсных композиций минерально-шлаковых вяжущих оценивали по расплыву цилиндра d=50 мм и h=50 мм при вибрации в течение 20 с. Использовались смеси глины и шлака (Г:Ш), карбонатной породы (доломитизированный известняк) и шлака (К:Ш) с 2 % активизатора и — для сравнения — карбонатной доломитизированной породы и цемента (К:Ц). Отформованные образцы-кубы хранились в нормальных условиях при влажности 100 % определенное количество суток, а затем определялись физико-механические показатели. Результаты испытаний приведены в табл. 5, 6 и отображены на рис. 5, 6 и 7.

Таблица 5 Состав и свойства пластифицированных и активизированных виброуплотненных композиций на основе шлака, цемента, карбоната (доломитизированного известняка) и глины

							Доб	авки-		Проч-
Ba		Соотнон		понентов по			пласт	ифика-	Пределы	ность
№ состава				тионентов по зы композита				и их	изменения	при
00		D /	o or mace	ы композит	ı			жание,	плотности,	сжатии,
2								%	$\kappa\Gamma/M^3$	МПа, на
	Шлак	Цемент	Глина	Карбонат	Вода	NaOH	C-3	ЛСТ		28 сутки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	60,00	-	40,00	-	33,70	<u>2,00</u>	-	-		34,5
	44,22		29,48		24,83	1,47				
2	60,00	-	40,00	-	27,00	<u>2,00</u>	-	-		32,3
	46,51		31,00		20,93	1,55				
3	60,00	-	40,00	-	<u>25,40</u>	<u>2,00</u>	0,3	-		29,5
	48,0		31,40		19,94	1,57				
4	60,00	-	40,00	-	24,40	<u>2,00</u>	0,6	-		34,1
	47,47		31,65		19,30	1,58				
5	60,00	-	40,00	-	23,70	2,00	0,9	-		29,0
	47,73		31,82		18,85	1,59			1700 2020	
6	60,00	-	40,00	-	23,30	<u>2,00</u>	1,2	-	1780-2020	34,3
	47,89		31,92		18,60	1,60				
7	60,00	-	<u>40,00</u>	-	23,00	<u>2,00</u>	1,8	-		33,0
	48,00		32,00		18,40	1,60				
8	60,00	-	40,00	-	<u>24,40</u>	<u>2,00</u>	-	0,3		27,7
	47,47		31,65		19,30	1,58				
9	60,00	-	40,00	-	23,30	<u>2,00</u>	-	0,6		32,0
	47,89		31,92		18,60	1,60				
10	60,00	-	40,00	-	22,60	2,00	-	0,9		31,8
	48,15		32,10		18,14	1,61			-	
11	60,00	-	40,00	-	22,20	<u>2,00</u>	-	1,2		40,6
	48,31		32,21		17,87	1,61			-	
12	60,00	-	40,00	-	22,10	<u>2,00</u>	-	1,8		40,1
1.0	48,35		32,23	40.00	17,81	1,61				260
13	60,00	-	-	40,00	22,60	2,00	-	-		26,0
1.4	48,15			32,10	18,14	1,61			-	21.2
14	60,00	-	-	<u>40,00</u>	18,10	2,00	-	-		31,3
1.7	49,96			33,31	15,07	1,67	0.2		-	40.2
15	<u>60,00</u>	-	-	<u>40,00</u>	16,80	2,00	0,3	-		40,2
17	50,51			33,67	14,14	1,68	0.6		-	42.0
16	60,00 50.80	-	-	<u>40,00</u>	16,10 12,62	2,00 1,60	0,6	-		43,8
17	50,80			33,87	13,63	1,69	0.0	1	-	15.6
17	60,00	-	-	<u>40,00</u>	15,70	2,00 1,70	0,9	-		45,6
18	50,98			33,98	13,34	1,70	1,2	_	1835-2080	40,7
18	<u>60,00</u>	-	-	40,00	15,50	2,00 1,71	1,2	_	1033-2000	40,/
19	51,06			34,04	13,19 15,40	1,71	1.0		-	22.2
19	<u>60,00</u>	-	-	<u>40,00</u>		2,00 1,70	1,8	_		32,2
20	51,11			34,07	13,12	1,70		0.2	-	20.9
20	60,00 50,68	-	-	40,00 22.78	16,40	2,00 1,69	-	0,3		39,8
	50,68			33,78	13,85	1,09		<u> </u>	l	

								Oro	нчание	табл.5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21		3	4		15,60	2,00	0		10	43,6
21	60,00 51,02	-	-	40,00		$\frac{2,00}{1,70}$	-	0,6		43,6
- 22				34,01	13,26	_		0.0	<u> </u>	46.2
22	60,00	-	-	40,00	15,20	<u>2,00</u>	-	0,9		46,3
	51,19			34,13	12,97	1,71			ļ	
23	60,00	-	-	40,00	14,90	2,00	-	1,2		35,6
	51,33			34,22	12,75	1,71				
24	60,00	-	-	40,00	14,40	2,00	-	1,8		33,8
	51,55			34,36	12,37	1,72				
25	-	60,00	-	40,00	<u>25,00</u>	-	-	-		50,1
		48,0		32,0	20,00					
26	-	60,0	-	40,0	20,00	-	-	-		73,3
		50,0		33,33	16,67					
27	-	60,0	-	40,0	19,60	-	0,3	-		75,5
		50,17		33,44	16,39					
28	-	60,0	-	40,0	18,20	-	0,6	-		85,5
		50,76		33,84	15,40					-
29	-	60,0	-	40,0	17,10	-	0,9	-	1915-2110	71,0
		51,24		34,16	14,60					,
30	-	60,0	-	40,0	16,30	-	1,2	-	İ	81,5
		51,59		34,39	14,02		ĺ			,
31	-	60,0	-	40,0	15,20	-	1,8	-	İ	69,0
		52,08		34,72	13,19		,-			,-
32	_	60,0	-	40,0	19,60	_	_	0,3	İ	61,7
		50,17		33,44	16,39			- ,-		- ,.
33	-	60,0	-	40,0	18,80	-	_	0,6	†	58,8
		50,51		33,67	15,82			-,-		,-
34	-	60,0	-	40,0	17,90	_	_	0,9	†	46,6
		50,89		33,93	15,18			- ,-		,.
35	_	60,0	_	40,0	17,20	_	_	1,2	†	42,1
		51,19		34,13	14,68			1,2		12,1
36	_	60,0	-	40,0	16,30	-	_	1,8	†	41,10
] 30	_	51,59	_	34,39	14,02	=	_	1,0		71,10
1		21,27		27,27	17,02					

Таблица 6 Изменение прочности композиционного вяжущего на основе шлака, карбоната (доломитизированного известняка) в зависимости от типа уплотнения и вида активизатора

№ состава	Тип уплотнения смеси	Соотношение компонентов по массе в % от массы композиционного вяжущего	Виды активизаторов и их соотношение по массе	Прочность композиционного вяжущего в 28-суточном возрасте
1			NaOH	25,9
2			K_2CO_3	73,8
3			Na ₂ CO ₃	63,4
4	Вибро-	Шлак:Карбонат:Вода:Активизатор	Na ₂ CO ₃ :K ₂ CO ₃ =1:2	60,5
5	уплотнение	60:40:23:2	$Na_2CO_3:K_2CO_3=2:1$	60,9
6	уплотнение	48,00 : 32,00 : 18,40 : 1,60	$Na_2CO_3+NaOH=1:2$	38,7
7			$Na_2CO_3+NaOH = 2:1$	51,9
8			$K_2CO_3+NaOH=1:2$	43,6
9			$K_2CO_3+NaOH=2:1$	50,8
10			NaOH	35,4
11			K_2CO_3	49,1
12			Na ₂ CO ₃	50,9
13		Шлак:Карбонат:Вода:Активизатор	$Na_2CO_3+K_2CO_3=1:2$	45,8
14	Прессование	60:40:12:2	$Na_2CO_3:K_2CO_3=2:1$	48,4
15		52,63 : 35,08 : 10,52 : 1,75	$Na_2CO_3+NaOH=1:2$	36,7
16			$Na_2CO_3+NaOH = 2:1$	39,4
17			$K_2CO_3+NaOH=1:2$	38,1
18			$K_2CO_3+NaOH=2:1$	41,6

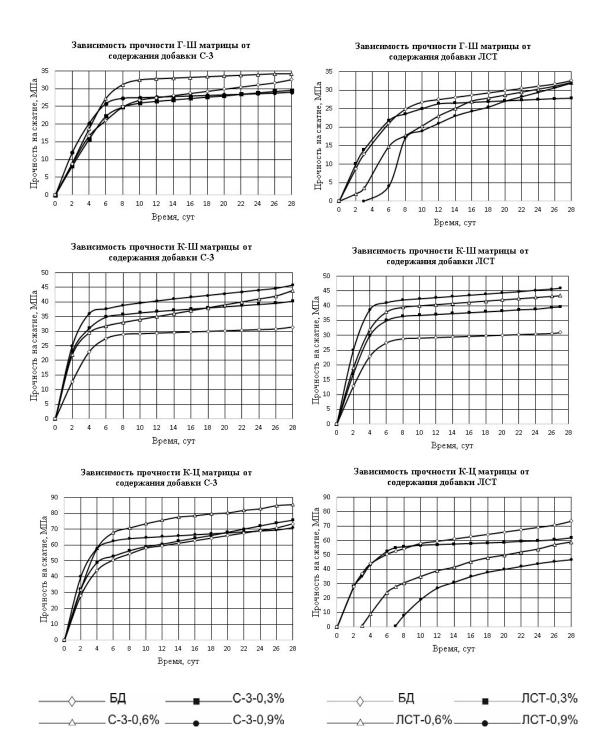


Рис. 5. Влияние расхода добавок C-3 и ЛСТ на прочность при сжатии минеральных композиций

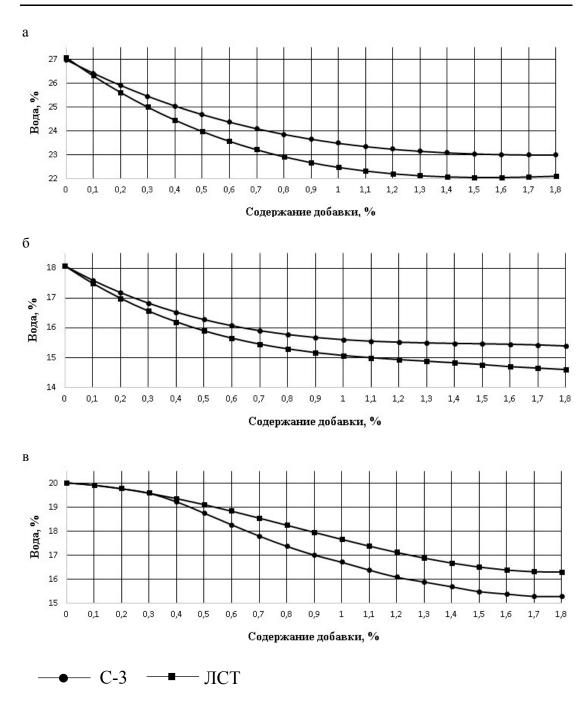


Рис. 6. Влияние расхода добавок С-3 и ЛСТ на водосодержание минеральных композиций: а – матрица ГШ; б – матрица КШ; в – матрица КЦ

Результаты определения водосодержания минеральных композиций, представленных на рис. 5, свидетельствуют о том, что пластифицирующие добавки С-3 и ЛСТ оказывают положительное влияние на снижение водопотребности смесей при расходе добавок 0,3-1,8 %. При равном виброрасплыве в указанном диапазоне расхода добавок С-3 и ЛСТ их водоредуцирующее действие соответственно составило: для глиношлаковых композиций – 15 % и 18 %, для карбонатно-шлаковых – 15 % и 20 %, для карбонатно-цементных – 18,5 % и 27 %. Как видно из результатов, наибольшую эффективность по снижению водопотребности показала добавка ЛСТ в карбонатно-шлаковых и карбонатно-цементных композициях.

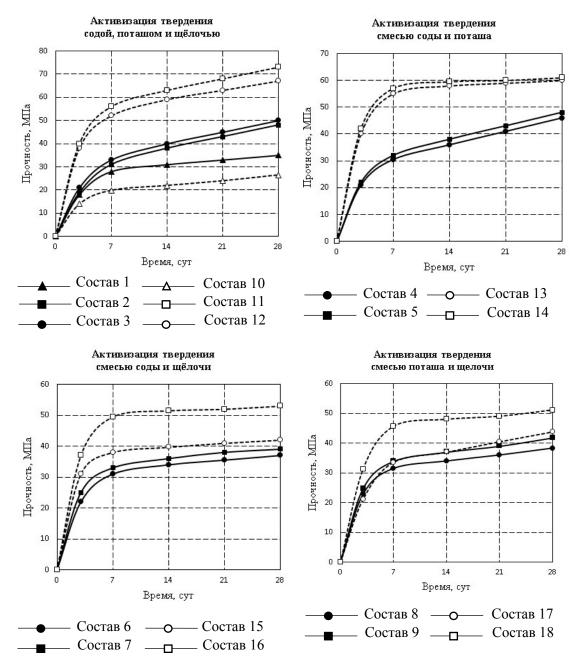


Рис. 7. Влияние активизирующих добавок на прочность при сжатии карбонатно-шлаковых композиций

Наибольшее блокирующее действие как в ранние, так и в поздние сроки наблюдается при твердении карбонатно-цементных (КЦ) композиций с ЛСТ, в которых понижение прочности в 28-суточном возрасте составляет при различном содержании добавки от 20 до 98 %.

Суперпластификатор С-3 в меньшей степени тормозит набор прочности, что согласуется с действием этих пластификаторов в цементном тесте, растворах и бетонах. В глиношлаковых (ГШ) композициях блокирующие действия С-3 и ЛСТ при пониженном содержании воды в них практически несущественны, т.е. наличие глины позитивно сказывается на твердении шлака в присутствии пластификаторов.

Наилучшие результаты по скорости набора прочности в присутствии пластификаторов отмечаются в карбонатно-шлаковых композициях. Карбонатные породы полностью снимают блокирующее действие ЛСТ как при низких её концентрациях, так и при высоких, которые являются «каталитическим ядом» для карбонатно-цементных систем. При всех дозировках С-3 и ЛСТ от малых до больших в карбонатно-шлаковых системах наблюдается прирост прочности во все сроки испытаний.

Наибольшая прочность при влажных условиях хранения достигнута на карбонатно-цементных композициях, что связано с более высокой прочностью цемента по сравнению со шлаком. Замедляющее действие добавки ЛСТ на раннюю прочность при сжатии карбонатно-цементных, глиношлаковых композиций чрезвычайно велико, поскольку в 3-суточном возрасте образцы не обладают распалубочной прочностью. Большой недобор прочности (от 19 до 98 %) имеют образцы на карбонатно-цементном вяжущем. При дозировке добавки ЛСТ более 0,6 % через 3 суток не достигается распалубочная прочность.

С целью изучения влияния активизаторов твердения щелочи NaOH, соды Na_2CO_3 , поташа K_2CO_3 на кинетику набора прочности карбонатно-шлаковых композитов при различных способах формования, были изготовлены образцы-кубы с ребром 30 мм методами вибропрессования при удельном давлении 15 МПа с влажностью смеси 12 % и виброуплотнения с влажностью 23 %. Суммарное содержание активизаторов твердения составляло 2 %.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 6, свидетельствуют о том, что поташ и сода являются более эффективными активизаторами твердения карбонатно-шлаковых композитов, чем щелочь. На прессованных образцах в 28-суточном возрасте у образцов с поташом прочность составила 49,1 МПа, с содой – 50,9 МПа, что превышает прочность образцов со щелочью соответственно на 39 и 44 %. На прочность виброуплотненных образцов в 28-суточном возрасте действие щелочных карбонатных солей значительно выше. У образцов с поташом прочность составила 73,8 МПа, с содой – 63,4 МПа, что превышает прочность образцов со щелочью соответственно на 185 и 145 %. Сочетание поташа и щелочи положительно сказывается на приросте прочности виброуплотненных образцов по сравнению с прессованными. При этом бинарные смеси щелочных солей Na₂CO₃ и К₂CO₃ и щелочи NaOH активизируют набор ранней прочности композиций в большей степени у виброуплотненных, чем у прессованных, обеспечивая повышенную нормативную прочность.

Таким образом, сильная активизация твердения карбонатно-шлаковых вяжущих на липецком шлаке обусловлена «содовым парадоксом» І рода, когда растворимость шлакового стекла повышается при замене щелочи NaOH на карбонатные соли натрия и калия. Активизирующее действие смесей NaOH и карбонатных солей (обусловленное «содовым парадоксом» ІІ рода) менее значительно, но оно превосходит индивидуальное действие щелочи NaOH.

Анализируя характер пор по ГОСТ 12730.3-78 и ГОСТ 12730.4-78, сделали вывод о том, что карбонатно-шлаковые композиции характеризуются средним размером пор (λ =1,1) и однородностью условно-замкнутых пор (α =0,3-0,5). Карбонатно-шлаковые материалы с содержанием шлака 60 % и приведенными параметрами пористости позволили получить их морозостойкость марки F200 и более, что вполне можно использовать для изготовления мелкоштучных изделий. Экспериментально был определен коэффициент теплопроводности композиционного карбонатно-шлакового материала, который находился в пределах 0,32-0,41 Вт/(м·°С) [8]. Установлено, что на его величину оказывают влияние количество шлака, удельная поверхность известняка, плотность композита. Композит с большим содержанием шлака показал более низкую теплопроводность. С уменьшением удельной поверхности известняка происходит снижение плотности композита, что сопровождается уменьшением коэффициента теплопроводности.

Технико-экономический анализ, проведенный для одного из вариантов использования карбонатно-шлакового вяжущего при изготовлении мелкоштучных изделий, показал, что себестоимость безобжигового кирпича на предлагаемом вяжущем с плотностью в пределах 1800-2000 кг/м³ в 1,3 раза ниже себестоимости силикатного и в 2,2 раза ниже себестоимости керамического обжигового, даже при условии транспортировки доменного гранулированного шлака на расстояние 400-600 км [4, 7–11].

Выводы

- 1. Результаты проведенных экспериментально-теоретических исследований показали, что на основе высокодисперсных техногенных отходов (металлургического шлака) и местных материалов (глин, карбонатных пород), активизированных минимальными количествами щелочей или карбонатными солями натрия и калия, можно получить высокоэффективные безобжиговые бесклинкерные минерально-шлаковые вяжущие различного строительного назначения.
- 2. Выявлены и обоснованы реакционные процессы отверждения минерально-шлаковых вяжущих за счет каустификации соды гидролизной известью и эпитаксиальное наращивание продуктов гидратации шлака на гранях кристаллов кальцита, а также процессы активизации шлака содой, каустификации соды гидролизной известью с регенерацией щелочи, бруситизации магнезита при наличии доломита в известняке.
- 3. В зависимости от состава, применяемых пластифицирующих и активизирующих добавок, технологических приемов уплотнения смесей получены минерально-шлаковые вяжущие на основе шлака, глины, кальцита и доломита с плотностью 1780—2080 кг/м³ и прочностью в 28-суточном возрасте в пределах от 30 до 70 МПа, позволяющие их использовать при изготовлении мелкоштучных изделий в виде тротуарной и облицовочной плитки, стеновых камней, фундаментных блоков и декоративных изделий.

Список литературы

- 1. Патент РФ №2133233. Бесклинкерное композиционное вяжущее / Калашников В.И., Хвастунов В.Л., Нестеров В.Ю. [и др.], Бюл. №20. 1999.
- 2. Патент РФ №2139263 Бесклинкерное композиционное вяжущее / Калашников В.И., Викторова О.Л., Нестеров В.Ю., Хвастунов В.Л. [и др.], Бюл. №28. 1999.
- 3. Калашников, В.И. Глиношлаковые строительные материалы / В.И. Калашников, В.Ю. Нестеров, В.Л. Хвастунов [и др.]; под общ. ред. д.т.н., проф. В.И. Калашникова. Пенза: ПГАСА, 2000. 206 с.
- 4. Хвастунов, В.Л. Безобжиговые малощелочные минерально-шлаковые вяжущие и бетоны на их основе / В.Л. Хвастунов, В.И. Калашников, А.В. Хвастунов // Технологии бетонов. Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. -2007. -№1. -C. 8-10.
- 5. Хвастунов, В.Л. Минерально-шлаковые вяжущие и бетоны на их основе / В.Л. Хвастунов, В.И. Калашников // Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси: справ. / Ю.А. Беленцов, В.Н. Вернигорова, В.С. Демьянова, В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов [и др.]; под ред. П.Г. Комохова. СПб.: НПО «Профессионал», 2009. Ч. II. 612 с. С. 118–150.
- 6. Глуховский, В.Д. Щелочные и щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны / под общ. ред. проф. В.Д. Глуховского. Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979.-232 с.
- 7. Калашников, В.И. Формирование прочности карбонатно-шлаковых и каустифицированных вяжущих: монография / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, Р.Н. Москвин. М., 2003. 97 с. Деп. в ФГУП ВНИИНТПИ, № 11886. Вып. 1.
- 8. Калашников, В.И. Карбонатно-шлаковые композиционные строительные материалы: монография / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, О.Л. Викторова. М., 2003. 101 с. Деп. в ФГУП ВНИИНТПИ, № 11888. Вып.1.
- 9. Хвастунов, В.Л. Экспериментально-теоретические основы получения композиционных вяжущих и строительных материалов из шлаков и высокодисперсных горных пород: дис. ... д-ра техн. наук / В.Л. Хвастунов. Пенза: $\Pi\Gamma$ УАС, 2005. 534 с.
- 10. Калашников, В.И. Методология получения геосинтетических и геошлаковых композиционных строительных материалов на основе осадочных силицитовых горных пород: монография / В.И. Калашников, Ю.В. Грачева, К.Н. Махамбетова. Пенза: $\Pi\Gamma$ УАС, 2011.-120 с.

- 11. Хвастунов, В.Л. Сцепление мелкозернистого бетона на цементных и минеральношлаковых вяжущих с арматурной сталью / В.Л. Хвастунов, А.В. Хвастунов, К.Н. Махамбетова, И.В. Коровченко // Международный научно-исследовательский журнал «Успехи современной науки». 2017. №3, Т. 6. С. 198–201.
- 12. Годовиков, А.А. Минерология / А.А. Годовиков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1983.-647 с.
- 13. Крешков, А.П. Основы аналитической химии. Теоретические основы. Качественный анализ. Т. 1 / А.П. Крешков. М.: Химия, 1970. 472с.

References

- 1. The patent of the Russian Federation No 2133233 Clinkerless composite binder / Kalashnikov V.I., Khvastunov V.L., Nesterov V.Yu. [etc.], Bul. No. 20. 1999.
- 2. The patent of the Russian Federation No 2139263 Clinkerless composite binder / Kalashnikov V.I., Viktorova O.L., Nesterov V.Yu., Khvastunov V.L. [etc.], Bul. No. 28. 1999.
- 3. Kalashnikov, V.I. Clay-slag building materials / V.I. Kalashnikov, V.Yu. Nesterov, V.L. Khvastunov [etc.]; Under the general editorship of the doctor of sciences, professor V.I. Kalashnikov. Penza: Penza State Academy of Architecture and Construction, 2000. 206 p.
- 4. Khvastunov, V.L. Unbaked low alkaline mineral-slag binders and concretes based on them / V.L. Khvastunov, V.I. Kalashnikov, A.V. Khvastunov // Concrete Technologies. Building materials, equipment and technologies of the XXI century. 2007. Vol. 1. P. 8–10.
- 5. Khvastunov, V.L. Mineral-slag binders and concretes based on them / V.L. Khvastunov, V.I. Kalashnikov // Cements, concretes, mortars and dry mixes. Part II. Reference book / Yu.A. Belentsov, V.N. Vernigorova, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, [etc.]; Edited by P.G. Komokhov. St. Petersburg: Scientific and Professional Association «Professional», 2009. 612 p. P. 118–150.
- 6. Glukhovsky, V.D. Alkali and Alkaline earth hydraulic binders and concrete / Under the General editorship of Professor V.D. Glukhovsky. Kiev: Vyshcha shkola. Head publishing house, 1979. 232 p.
- 7. Kalashnikov, V.I. Formation of the strength of carbonate-slag and caustifying binders: monograph / V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, R.N. Moskvin. M., 2003 97 p. Dep. in Federal State Unitary Enterprise, All-Union Scientific Research Institute of the problems of scientific and technological progress and information in construction. Vol. 11886 (1).
- 8. Kalashnikov, V.I. Carbonate-slag composite building materials: monograph / V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, O.L. Viktorova. M., 2003 101p. Dep. in Federal State Unitary Enterprise, All-Union Scientific Research Institute of the problems of scientific and technological progress and information in construction. Vol. 11888 (1).
- 9. Khvastunov, V.L. Experimental and theoretical foundations for the production of composite binders and building materials from slags and highly dispersed rocks: Dis. ... doctor of sciences. Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2005. 534 p.
- 10. Kalashnikov, V.I. Methodology of obtaining geosynthetic and geoslag composite building materials based on sedimentary silicite rocks monograph / V.I. Kalashnikov, Yu. V. Gracheva, K.N. Makhambetova. Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2011. 120 p.
- 11. Khvastunov, V.L. Adhesion of fine-grained concrete on cement and mineralslag binders with armature steel / V.L. Khvastunov, A.V. Khvastunov, K.N. Makhambetova, I.V. Korovchenko // International research journal «Modern Science Success». 2017. No 3, Vol. 6. P. 198–201.
- 12. Godovikov, A.A. Mineralogy. 2nd ed., rewrited and completed / A.A. Godovikov. M.: Nedra. 1983. 647 p.
- 13. Kreshkov, A.P. The Basics of analytical chemistry. Theoretical basis. Qualitative analysis. Vol. 1 / A.P. Kreshkov. M.: Publishing House «Chemistry», 1970. 472 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 539.3

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева

Россия, 430006, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68,

тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

Селяев Владимир Павлович,

доктор технических наук, профессор, академик PAACH E-mail: ntorm80@mail.ru

Селяев Павел Владимирович,

кандидат технических наук, доцент

E-mail: ntorm80@mail.ru

Безрукова Евгения Сергеевна,

аспирант кафедры «Строительные конструкции»

E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

Кечуткина Евгения Львовна,

инженер кафедры «Строительные конструкции»

E-mail: kechytkina85@mail.ru

Mordovian National Research State University named after N.P. Ogarev

Russia, 430006, Saransk, 68, Bolshevistskaya St.,

tel.: +7(8342)47-71-56; fax: +7(8342)47-71-56

Selyaev Vladimir Pavlovich,

Doctor of Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences

E-mail: ntorm80@mail.ru

Selyaev Pavel Vladimirovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor

E-mail: ntorm80@mail.ru

Bezrukova Evgenia Sergeevna,

Postgraduate of the department «Building

Structures»

E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

Kechutkina Evgeniya Lvovna,

Engineer of the department «Building

Structures»

E-mail: kechytkina85@mail.ru

ИЗГИБ БАЛКИ ИЗ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА С ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.С. Безрукова, Е.Л. Кечуткина

Рассматривается возможность определения прогиба балки из физически нелинейно деформируемого материала под действием нагрузки с учетом изменения его фрактальной структуры. Используя метод начальных параметров и вариационный метод Ритца — Тимошенко и методы фрактальной геометрии Мандельброта, провели анализ влияния структурных характеристик материала на работу конструкции.

Ключевые слова: фрактальная структура, фрактальная размерность, изгиб балки, нелинейно деформируемый материал, упругая работа, метод Ритца – Тимошенко

BEAM BENDING OF PHYSICALLY NONLINEAR DEFORMABLE MATERIAL WITH FRACTAL STRUCTURE

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.S. Bezrukova, E.L. Kechytkina

This article examines the possibility of determining the deflection of beams of physically nonlinear deformable material under load, taking into account the changes of the fractal structure.

Using the method of initial parameters and variational method, of Ritz-Timoshenko as well as methods of fractal geometry of Mandelbrot the analyses of influence of structural characteristics of the material one the structure behavior was done.

Keywords: fractal structure, fractal dimension, beam bending, nonlinear deformable material, elastic work, Ritz-Timoshenko method

Фрактальная структура рассматриваемого в статье материала определяется фрактальной размерностью, величиной D. Введение представления о фрактальной размерности дает возможность исследовать закономерности влияния структурных параметров материала на работу конструкции. Изменение, перестройка структуры материала может происходить под действием нагрузки и/или агрессивной среды, что определяет актуальность данного исследования [1-2, 4].

Целью данной работы является анализ влияния изменения структуры материала на работу конструкции под действием нагрузки. В качестве такой конструкции в статье рассматривается однопролетная шарнирно опертая балка с приложенной по всей длине балки равномерно распределенной нагрузкой.

Для выявления закономерностей влияния изменения фрактальной размерности на изгиб балки из физически нелинейно деформируемого материала достаточно использовать относительно простой вариант нагружения балки. При необходимости задача может быть усложнена.

Решение данной задачи производилось тремя различными методами: при упругой работе балки методом начальных параметров; при неупругой работе балки вариационным методом Ритца — Тимошенко (МРТ) [3]; МРТ с учетом изменения фрактальной размерности материала.

Дифференциальное уравнение изгиба балки из нелинейно деформируемого материала имеет вид:

$$\frac{d^{2}}{dz^{2}} \left[J_{c} \left(W \left(z \right) \right) \cdot \frac{d^{2}W}{dz^{2}} \right] = q \left(z \right). \tag{1}$$

В развернутой форме

$$J_{c}(W)\frac{d^{4}W}{dz^{4}} + 2\frac{dJ_{c}(W)}{dz}\frac{d^{3}W}{dz^{3}} + \frac{d^{2}J_{c}(W)}{dz^{2}}\frac{d^{2}W}{dz^{2}} = q(z),$$
 (2)

где $J_{c}(W)$ – переменная по длине жесткость поперечного сечения балки,

$$J_{c}(W) = \int_{-h/2} E_{c}(\varepsilon_{i}) y b(y) dy;$$
(3)

здесь b(y) – ширина балки; E_c – секущий модуль; W – полный прогиб балки;

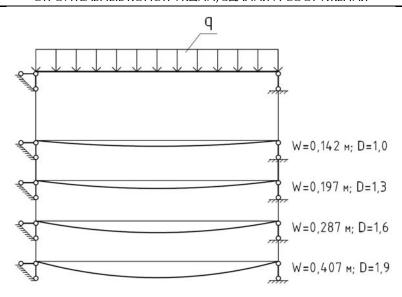
$$\varepsilon_z = -\frac{d^2W}{dz^2} y. \tag{4}$$

Расчетная схема балки приведена на рисунке.

Для расчета применим метод Ритца – Тимошенко, суть которого состоит в определении экстремума – минимума полной потенциальной энергии П тела:

$$\Pi = V - A,\tag{5}$$

где V — потенциальная энергия упругих связей деформируемого тела; A — работа внешних сил, приложенных к балке.



Расчетная схема балки

Поиск экстремума производим из анализа равенства нулю первой производной $d\Pi = 0$.

$$\delta\Pi = \delta(V - A). \tag{6}$$

Полная потенциальная энергия упругих связей деформируемого тела равна:

$$V = \iiint (dv) dx dy dz, \qquad (7)$$

где $dv = \int\limits_0^{\varepsilon_i} \sigma_i \left(\varepsilon_i \right) d\varepsilon_i$ – удельная (приходящаяся на элементарный объем тела)

потенциальная энергия деформации твердого тела.

Для определения удельной потенциальной энергии упругих связей необходимо выбрать вид функции диаграммы деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » с учетом, что в изгибаемом элементе для каждого *i*-го волокна $\sigma_i = \sigma_i \varepsilon_i = \varepsilon$.

Примем функцию диаграммы деформирования в виде кубической параболы вида:

$$\sigma_i = \alpha \varepsilon_i - m \varepsilon_i^3. \tag{8}$$

Для материала с фрактальной структурой функция П.П. Лукаша после применения преобразования Б. Мандельброта примет вид:

$$\sigma(D) = C_1^{-1} \alpha \varepsilon^D - C_2^{-1} m \varepsilon^{2+D}, \tag{9}$$

где $\sigma(D)$ – напряжение в материале с фрактальной структурой; C_1 , C_2 – константы, характеризующие масштабный уровень структуры; α и m – параметры, определяемые по экспериментальным диаграммам деформирования из граничных условий.

$$\alpha = \frac{d\sigma_{\scriptscriptstyle E}}{d\varepsilon} = E_{\scriptscriptstyle 0};$$
 при $\varepsilon \to 0; \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ при $\varepsilon = \varepsilon_{\scriptscriptstyle bu}$,

где σ_E — напряжение в материале при моделировании в евклидовом пространстве; D — фрактальная размерность, которая больше евклидовой и является характеристикой структурной неоднородности материала.

Тогда удельная потенциальная энергия dv будет равна:

• в евклидовой системе измерений:

$$dv_E = \frac{1}{2} E y^2 (W'')^2 - \frac{1}{4} m y^4 (W'')^4, \qquad (10)$$

где
$$W'' = \frac{d^2W}{dz^2}$$
;

• в системе Б. Мандельброта:

$$dv_{D} = \frac{E}{C_{1}(D+1)} \left(-y\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{D+1} - \frac{m}{C_{2}(3+D)} \left(-y\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{D+3}.$$
 (11)

Проинтегрировав выражения (10) и (11) по объему балки, получим:

$$V_{E} = \int_{0}^{l} \int_{F} dv_{E} = \frac{1}{2} E J_{0} \int_{0}^{l} \left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}} \right)^{2} dz - \frac{1}{4} m J_{n} \int_{0}^{l} \left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}} \right)^{4} dz,$$
 (12)

$$V_{D} \frac{EJ_{1}}{C_{1}(D+1)} \int_{0}^{l} \left(-\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{D+1} dz - \frac{m}{C_{2}(D+3)} J_{2} \int_{0}^{l} \left(-\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{3+D} dz, \tag{13}$$

где
$$J_0 = \frac{bh^3}{12}$$
; $J_h = \frac{bh^5}{80}$

$$J_1 = \frac{2b}{D+2} \left(\frac{h}{2}\right)^{D+2}; J_2 = \frac{2b}{D+4} \left(\frac{h}{2}\right)^{D+4}.$$

Исходя из принципа соответствия, можно принять в (13) $\left(-\frac{d^2W}{dz^2}\right) = \left(\frac{d^2W}{dz^2}\right)$.

Работа, совершаемая внешними силами, приложенными к балке, будет равна:

$$A(q) = \int_{0}^{l} q(z)W(z)dz.$$
 (14)

Функцию прогибов W(z) определяем из условия, что $M(z) = -\frac{d^2W}{dz^2}EJ_z$. В рассматриваемом случае $M(z) = 0,5q\ell z - 0,5qz^2$.

Тогда
$$EJ_z \cdot W^1 = -0,25q\ell z^2 + \frac{1}{6}qz^3 + C$$
.

Так как $W^1=\theta$, то для $\theta=0$ имеем $z=\ell/2$. Тогда $C=\frac{1}{24}q\ell^3$. Уравнение изгиба

балки $EJ_z \cdot W = -\frac{q\ell}{4} \frac{z^3}{3} + \frac{q}{6} \frac{z^4}{4} + \frac{q}{24} \ell^3 z$ будет иметь вид:

$$W_z = \frac{q}{24EJ_z} \left[\ell^3 z - 2\ell z^3 + z^4 \right]. \tag{15}$$

Аппроксимируем прогиб балки функцией вида:

$$W_z^0 = \sum_{n=1}^N k_n \gamma(z), \tag{16}$$

где
$$\gamma(z) = \frac{d^2W}{dz^2}$$
.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ Тогда уравнения (12) и (13) с учетом преобразования (16) примут вид:

$$V_{E} = \frac{1}{2} E J_{0} \int_{0}^{l} (k_{n} \gamma(z))^{2} dz - \frac{1}{4} m J_{n} \int_{0}^{l} (k_{n} \gamma(z))^{4} dz;$$
 (17)

$$V_{D} = \frac{EJ_{1}}{C_{1}(D+1)} \int_{0}^{l} (k_{n}\gamma(z))^{D+1} dz - \frac{m}{C_{2}(D+3)} J_{2} \int_{0}^{l} (k_{n}\gamma(z))^{D+3} dz, \qquad (18)$$

где k_n – обобщенные координаты.

Обозначим
$$\alpha^{E}\left(z\right)_{1}=\int\limits_{0}^{l}\gamma\left(z\right)^{2}dz=\int\limits_{0}^{l}\left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{2}dz;\;\;\alpha^{E}\left(z\right)_{2}=\int\limits_{0}^{l}\left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{4}dz;\;\;$$

$$\alpha^{D}\left(z\right)_{1}=\int\limits_{0}^{l}\gamma\left(z\right)^{D+1}dz=\int\limits_{0}^{l}\left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{D+1}dz;\;\;\alpha^{D}\left(z\right)_{2}=\int\limits_{0}^{l}\left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{D+3}dz\;.$$

Тогда уравнения (17) и (18) прим

$$V_{E} = \frac{1}{2} E J_{0} k_{n}^{2} \alpha^{E} (z)_{1} - \frac{1}{4} m J_{n} k_{n}^{4} a^{E} (z)_{2};$$
(19)

$$V_{D} = \frac{EJ_{1}}{C_{1}(D+1)} k_{n}^{D+1} a^{D}(z)_{1} - \frac{m}{C_{2}(D+3)} J_{2} k_{n}^{D+3} a^{D}(z)_{2}.$$
 (20)

Работа внешних сил q(z) определяется по формуле

$$A_{q} = \int_{0}^{l} (z)W(z)dz.$$

Следовательно, полная потенциальная энергия будет равна:

$$\Pi_{1} = \frac{1}{2} E J_{0} \int_{0}^{l} \left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}} \right)^{2} dz - \frac{1}{4} m J_{n} \int_{0}^{l} \left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}} \right)^{4} dz - \int_{0}^{l} q(z) w dz, \tag{21}$$

$$\Pi_{2} = \frac{EJ_{1}}{C_{1}(D+1)} \int_{0}^{l} \left(\frac{d^{2}W}{dz^{2}}\right)^{D+1} dz - \frac{m}{C_{2}(D+3)} J_{2} \int_{0}^{l} \left(\frac{d^{2}W}{dz^{3}}\right)^{3+D} dz - \int_{0}^{l} q(z)wdz.$$
(22)

Прогиб балки представим в виде ряда с конечным числом членов:

$$W(z) = \sum_{n=1}^{N} k_n \varphi_n(z), \quad n = 1, 2, \dots N,$$
 (23)

где $\phi_n(z)$ – аппроксимирующая функция; k_n – обобщенные координаты. В качестве аппроксимирующей функции $\phi_n(z)$ в первом приближении возьмем уравнение прогибов упругой балки при заданной нагрузке.

$$W(z) = \frac{q}{24EI} (\ell^3 z - 2\ell z^3 + z^4). \tag{24}$$

Подставив функцию (23) в (21), получим:

$$\Pi(k) = f_1 k^2 - f_2 k^4 - f_3 k, \qquad (25)$$

где
$$f_1 = \frac{1}{2} E J_0 \int_0^l \left(\varphi_n^{"} \right)^2 dz$$
; $f_2 = \frac{1}{4} m J_h \int_0^l \left(\varphi'' \right)^4 dz$; $f_3 = \int_0^l q(z) \varphi dz$.

Находим экстремум функции (25):

$$\frac{d\Pi}{dk} = 2f_1k - 4f_2k^3 - f_3 = 0. {26}$$

Для определения коэффициентов f_i в уравнении (26) необходимо определить производные:

$$\varphi' = \frac{dw}{dz} = B(\ell^3 - 6\ell z^2 + 4z^3), \tag{27}$$

$$\varphi'' = \frac{d^2 w}{dz^2} = B\left(-12\ell z + 12z^2\right),\tag{28}$$

где $B = \frac{q}{24EJ}$.

Тогда

$$f_1 = \frac{1}{2} E J_0 \int_0^l \left[B \left(-12\ell z + 12z^2 \right) \right]^2 dz , \qquad (29)$$

$$f_2 = \frac{1}{4} m J_h \int_0^l \left[B\left(-12\ell z + 12z^2\right) \right]^4 dz , \qquad (30)$$

$$f_3 = \int_0^l qB(\ell^3 z - 2\ell z^3 + z^4) dz.$$
 (31)

Принимаем q=500 кг/м; $E=2\cdot10^5$ кг/см 2 ; b=0,2м, h=0,4м, $\ell=6,0$ м; $J_0=\frac{bh^3}{12}$; $J_h=\frac{bh^5}{80}$; $m=\frac{E_0}{3\varepsilon_{bu}^2}$; $\varepsilon_{bu}=0,002$.

Подставив функцию (23) в (22), получаем:

$$\Pi(k) = f_4 k^{D+1} - f_5 k^{D+3} f_6 k,$$

где
$$f_4 = \frac{EJ_1}{C_1(D+1)} \int_0^l \left(\varphi_n^{11}\right)^{D+1} dz; \quad f_5 = \frac{mJ_2}{C_2(D+3)} \int_0^l \left(\varphi_n^{11}\right)^{D+3} dz; \quad f_6 = f_3.$$

$$\frac{d\Pi}{dk} = 2f_4 k^D - 4f_5 k^{D+2} - f_6; \tag{32}$$

$$f_4 = \frac{EJ_1}{C_1(D+1)} \int_0^l \left[B\left(-12\ell z + 12z^2\right) \right]^{D+1} dz; \tag{33}$$

$$f_5 = \frac{mJ_2}{C_2(D+3)} \int_0^l \left[B\left(-12\ell z + 12z^2\right) \right]^{D+3} dz; \tag{34}$$

$$f_6 = f_3$$
.

В формулах (29), (30), (33), (34) подынтегральные функции можно записать общей функцией вида:

$$B \cdot 12^h \left(z^2 - \ell z\right)^h,\tag{35}$$

где h – показатель степени.

Так как $B \cdot 12^h$ – это константы, то необходимо найти интеграл вида:

$$\int_{0}^{l} \left(z^2 - \ell z\right)^h dz \,. \tag{36}$$

В подынтегральной функции выделим полный квадрат.

$$z^{2} - \ell z + 0,25\ell^{2} - 0,25\ell^{2} = (z - 0,5\ell)^{2} - 0,25\ell^{2}.$$

Полагаем далее $z - 0, 5\ell = t, z = t + 0, 5\ell$ и dz = dt.

Тогда интеграл (36) можно записать в виде:

$$\int_{0}^{l} \left(t^2 - 0, 25\ell^2\right)^h dt \ . \tag{37}$$

Интеграл легко вычисляется, если положить $t^2-0,25\ell^2=k$.

Тогда 2dt = dk и dt = 0,5dk, что дает:

$$\int_{0}^{l} k^{h} \cdot 0.5 \, dk = 0.5 \, \frac{k^{h+1}}{h+1} + C. \tag{38}$$

Подставляя последовательно k и t, получаем:

$$\int_{0}^{l} \left(z^{2} - \ell z\right)^{h} dz = \frac{\left(z^{2} - \ell z\right)^{h+1}}{2(h+1)} + C \Big|_{0}^{e}.$$
(39)

Из граничных условий C=0.

Тогда получаем:

$$f_1 = 0.5EJ_0 (12B)^2 \frac{(z^2 - \ell z)^{2+1}}{(2+1) \cdot 2},$$
(40)

$$f_2 = 0,25mJ_h \left(12B\right)^4 \frac{\left(z^2 - \ell z\right)^{4+1}}{\left(4+1\right) \cdot 2},\tag{41}$$

$$f_3 = qB \left(\ell^3 \frac{z^2}{2} - 2\ell \frac{z^4}{4} + \frac{z^5}{5} - \frac{\ell^5}{5} \right), \tag{42}$$

$$f_4 = \frac{EJ_1}{C_1(D+1)} (12B)^{D+1} \frac{\left(z^2 - \ell z\right)^{D+2}}{2(D+2)},\tag{43}$$

$$f_5 = \frac{mJ_2}{C_2(D+3)} (12B)^{D+3} \frac{\left(z^2 - \ell z\right)^{D+4}}{2(D+4)}.$$
 (44)

Для расчета формул (40)–(44) предварительно определим:

$$J_0 = 1,0667 \cdot 10^{-3}; \ J_h = 2,56 \cdot 10^{-5}; \ B = 9,766 \cdot 10^{-6}; \ z = 3,0 \text{ m};$$
 $m = 1,667 \cdot 10^{14}; \ C_1 = 1; \ C_2 = 1.$

Тогда характеристики f_1, f_2, f_3, f_6 (40)–(42) будут равны:

$$f_1 = -1,77979$$
; $f_2 = -0,001188$; $f_3 = f_6 = 91,8369$.

Расчет численных значений f_4 и f_5 (43)–(44) для материала с фрактальной структурой, а также вспомогательных переменных, зависящих от фрактальной размерности D, сведем в табл. 1. Рассмотрим три случая: D = 1,3;1,6;1,9.

Таблица 1

D	J_1	J_2	f_4	f_6
1,3	$5,98 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	- 0,10096	$-7,76\cdot10^{-5}$
1,6	$3,38 \cdot 10^{-4}$	$8,70\cdot 10^{-6}$	- 0,00592	$-5,13\cdot10^{-6}$
1,9	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$5,09 \cdot 10^{-6}$	- 0,00036	$-3,43\cdot10^{-7}$

Решая кубическое уравнение (26), получим k = 35,85877.

При решении уравнения (32) для фрактального случая при различных значениях фрактальной размерности D=1,3;1,6;1,9 получим: k=49,781;72,679;102,889 соответственно.

Тогда прогиб балки без учета фрактальной структуры материала будет равен:

$$W(z) = kW = k\frac{q}{24EJ}(\ell^3 z - 2\ell z^3 + z^4) = 0,14182 \text{ M}.$$

Принимая во внимание структурную неоднородность материала, имеем следующие значения прогиба балки с длиной l=3;6 м соответственно для каждой рассматриваемой фрактальной размерности:

- при D = 1,3: W(z) = 0,012 м; 0,197 м;
- при D = 1,6: W(z) = 0,0178 м; 0,287 м;
- при D = 1,9: W(z) = 0,025 м; 0,407 м.

В табл. 2 представлены значения относительного прогиба f/l для балки длиной $l=3;6\,$ м при упругой, упругопластической работе и для каждой рассматриваемой фрактальной размерности.

Таблица 2

<i>l</i> , м	f	f	f					
ι, Μ	J e	J ер	D = 1,3	D = 1,6	D = 1.9			
3	1/2500	1/345	1/250	1/169	1/120			
6	1/4045	1/42	1/30	1/21	1/15			

Выводы

Модель, в которой учитывается изменение фрактальной размерности, дает возможность оценить, как влияет изменение фрактальной размерности структуры материала на работу конструкции под действием нагрузки. Из полученных значений прогиба балки для соответствующих фрактальных размерностей D=1;1,3;1,6;1,9 можно сделать вывод о том, что чем выше фрактальная размерность (иными словами, чем менее упорядочена структура), тем выше величины прогибов балки независимо от ее длины, соответственно, тем хуже работает конструкция на изгиб.

Таким образом, исходя из того, что фрактальная структура материала оказывает значительное влияние на величину прогиба балки, для адекватной оценки работы конструкции под действием нагрузки и/или агрессивной среды необходимо учитывать фрактальную размерность.

Список литературы

- 1. Балханов, В.К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления / В.К. Балханов. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. 224 с.
- 2. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. М.: Изд-во Института компьютерных исследований, 2002. 656 с.
- 3. Петров, В.В. Методы расчета балок, пластин и призматических оболочек из нелинейно-деформируемого материала / В.В. Петров, И.В. Кривошеин, П.В. Селяев. Саранск: Морд. гос. ун-т, 2009. 164 с.
- 4. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов: монография / В.П. Селяев, П.В. Селяев. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018.-220 с.

References

- 1. Balkhanov, V.K. Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus / V.K. Balkhanov. Ulan-Ude: Publishing house of Buryat State University, 2013. 224 p.
- 2. Mandelbrot B. Fractal geometry of nature / B. Mandelbrot. M.: Publishing house Institute of computer research, 2002. 656 p.
- 3. Petrov, V.V. Methods for calculating beams, plates and prismatic shells made of non-linear deformable material / V.V. Petrov, I.V. Krivoshein, P.V. Selyaev. Saransk: Mord. state. un-t, 2009.-164~p.
- 4. Selyaev, V.P. Physical and chemical bases of destruction mechanics of cement composites: monograph / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. Saransk: Mordovia publishing house. un-ta, 2018. 220 p.

УДК 69.059.032

OOO «Современные строительные решения»

Саденко Денис Сергеевич,

кандидат технических наук, инженер E-mail: sadenko_d@list.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства Россия, 440028, г. Пенза,

ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гарькин Игорь Николаевич,

доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

LLC Modern Building Solutions

Sadenko Denis Sergeevich,

Candidate of Sciences, Engineer E-mail: igor_garkin@mail.ru Penza State University of Architecture and Construction Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Garkin Igor Nikolaevich,

Associate Professor of the department «Quality management and technology of building production» E-mail: igor_garkin@mail.ru

ПРИЧИНЫ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С КОРРОЗИЕЙ БЕТОНА

Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин

Анализируются основные причины появления дефектов в монолитных железобетонных конструкциях на этапах производства и укладки бетонных смесей при строительстве. Приводятся методы повышения качества изготовляемых монолитных железобетонных конструкций на основе контроля показателей, влияющих на образование дефектов вследствие внутренней коррозии.

Ключевые слова: бетонные смеси, дефекты монолитных конструкций, зимние условия бетонирования, контроль качества, местные строительные материалы, монолитные работы, пластификаторы, реакционноспособный кремнезем

CAUSES OF DEFECTS IN PRODUCTION OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE STRUCTURES RELATED TO CONCRETE CORROSION

D.S. Sadenko, I.N. Garkin

The main reasons for the appearance of defects in monolithic reinforced concrete structures that arise at the stages of production and placement of concrete mixtures during construction are analyzed. Methods for improving the quality of manufactured monolithic reinforced concrete structures based on monitoring indicators affecting the formation of defects due to internal corrosion are given.

Keywords: concrete mixes, defects in monolithic structures, winter concreting conditions, quality control, local building materials, monolithic works, plasticizers, reactive silica

При проведении многочисленных испытаний в рамках строительного контроля выполняемых работ при возведении зданий с монолитным каркасом поднимаются вопросы повышения качества железобетонных конструкций на всех этапах их производства [1]. При изготовлении бетонных смесей важно добиваться качественных показателей при меньших затратах на материалы и технологии их производства. Для строителей, выполняющих монолитные работы, актуальным является удобство работы с материалом, соответствие его требованиям нормативной и проектной документации. Одним из решений поставленных задач является использование эффективных суперпластификаторов (СП) и гиперпластификаторов (ГП) нового поколения. Произво-

дители добавок в бетонные смеси постоянно расширяют линейки своей продукции, в связи с этим для определения эффективности их применения необходимо постоянно проводить статистические исследования степени их влияния не только на прочностные и деформативные свойства бетонов, но и на их долговечность и бездефектную эксплуатацию.

При проведении контроля качества участились случаи выявления дефектов в монолитных конструкциях в виде трещин, возникающих после снятия опалубки. Данные трещины имеют ширину раскрытия до 1,5 см и не являются силовыми или усадочными. Динамика набора прочности идет согласно заданным параметрам при создаваемых благоприятных условиях твердения. Отсутствие следов карбонизации, воздействия органических или неорганических кислот привело к выводу: необходимо остановиться на исследовании бетонных смесей на предмет наиболее вероятного варианта — щелочной коррозии.

Данные исследования обусловлены использованием в качестве мелкого заполнителя местных природных песков, где периодически обнаруживается повышенное содержание реакционноспособного аморфного кремнезема, хотя в сопроводительных документах о качестве материала указано, что песок соответствует ГОСТ. При использовании современных портландцементов с высоким содержанием щелочей данные включения приводят к процессам расширения бетона вследствие расклинивающего действия геля в зёрнах заполнителя; увеличивающиеся в размерах зёрна заполнителя разрушают прилегающую к ним растворную часть бетона, вызывая повышение внутренних напряжений с последующим образованием дефектов в виде трещин [2]. Подобные дефекты выявляются на различных этапах строительства, в нагруженных и ненагруженных конструкциях. Что же является катализатором реакций, установить достаточно сложно, т.к. производство монолитных конструкций является многофакторным процессом. Анализ причин появления коррозии и скорости ее протекания в бетоне показывает, что основными являются:

- наличие реакционноспособного аморфного кремнезема (диоксид кремния) в крупном заполнителе и мелком наполнителе;
 - повышенные содержание щелочей и количество растворимых щелочей в бетоне [2];
 - несоответствие температурно-влажностного режима твердения бетона.

Зафиксированы случаи образования трещин, появившихся при зимних условиях бетонирования через две недели после укладки бетонной смеси, в ненагруженных конструкциях, где к уже имеющимся факторам, влияющим на появление коррозии, добавляется электропрогрев конструкций (рис. 1). В случае неправильного выбора условий ухода за конструкциями или технологических ошибок при выборе режима прогрева [3] происходят значительный перегрев и пересушивание конструкций в опалубке, что, в свою очередь, повышает скорость возникновения осмотического давления и вязкости образовавшегося геля в структуре бетона.



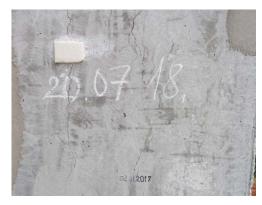


Рис. 1. Наблюдение за динамикой развития трещин в бетоне, уложенном в зимний период

В последнее время большое внимание уделяется не только подбору составов бетона для достижения проектных классов по прочности, контролю за качеством производства работ на строительных площадках, но и исследованию влияния материалов и конструкций на процессы взаимодействия реакционноспособного кремнезема заполнителей со щелочами цемента и добавок, что вызывает разрушение бетона.

Согласно исследованиям [4], на процесс возникновения коррозии, помимо термовлажностных условий твердения, большое влияние оказывает водоцементное отношение. Наибольшее расширение наблюдается в диапазоне В/Ц=0,48-0,52, с максимальным значением 0,24 % при В/Ц=0,5 (рис. 2). Значения правой кривой, идущей на уменьшение при увеличении В/Ц, объясняются тем, что «с ростом значения В/Ц при сохранении постоянного расхода цемента уменьшается концентрация щелочей, образующихся в жидкой фазе твердеющего цементного камня». Результаты, представленные в левой кривой, говорят о том, что «при снижении В/Ц возрастает плотность и прочность цементного камня, а поэтому изменяются условия диффузии ионов, принимающих участие в реакции, и, кроме того, изменяются структурные свойства полупроницаемой перегородки» [4]. В данном исследовании было установлено низкое влияние на расширение заполнителей воздухововлечения (производители бетона указали именно этот диапазон в качестве рабочего).

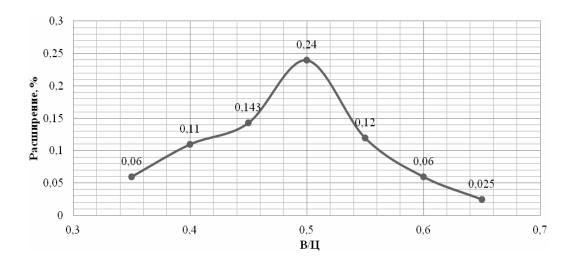


Рис. 2. Влияние величины В/Ц на расширение бетона

Исходя из полученных данных закономерно остановиться на исследовании в области В/Ц менее 0,45, т.к. высокие значения приводят к понижению физико-механических характеристик бетона.

Добиться низкого водоцементного отношения в современных условиях несложно, используя эффективные СП и ГП нового поколения. Но, добиваясь улучшенных показателей бетона с применением новых добавок, мы получаем новые задачи для исследования в связи с наличием в них большого количества щелочей [5, 6]. Важно не только произвести эксперименты в лабораторных условиях и ввести корректировки на заводах-изготовителях, но и обеспечить наблюдение за конструкциями на строительных площадках в соответствии с СП 435.1325800.2018. Было установлено влияние содержания щелочей, введенных в цемент в виде гидратов окисей калия и натрия, на относительные деформации расширения. На рис. 3 представлены результаты наблюдения за образцами бетона с различным содержанием щелочей.

Согласно данным исследованиям, дефекты в виде трещин появлялись при содержании щелочей 0,06-0,01 %, что доказывает, что именно данный компонент приводит к расширению бетона.

В [2] сформулированы меры защиты от коррозии (рис. 4).

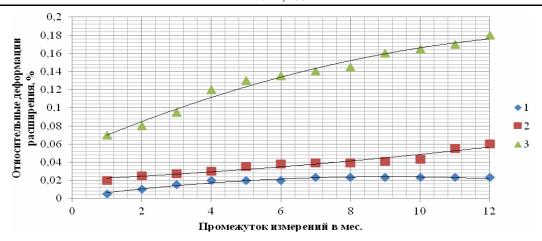


Рис. 3. Влияние содержания щелочей в бетоне на относительные деформации расширения: 1-0.1%; 2-0.52%; 3-0.99%



Рис. 4. Защита бетонных конструкций от коррозии

Приведенные способы защиты должны применяться на различных этапах производства бетонных конструкций. Отсутствие контроля за химическим составом компонентов бетона приводит к дополнительным экономическим трудозатратам, связанным с необходимостью усиления строительных конструкций (рис. 5).





Рис. 5. Восстановление работоспособности монолитных ж/б конструкций, нарушенной вследствие возникновения дефектов в виде трещин из-за расширения бетона

Для защиты бетона необходимы мероприятия с целью контроля показателей, влияющих на образование дефектов:

- лабораторные исследования местных карьеров с мелким заполнителем на наличие реакционноспособного кремнезема;
 - исследования влияния новых СП и ГП на процессы образования коррозии в бетоне;

- контроль качества используемых цементов с определением количества щелочей;
- обязательный инструментально-визуальный осмотр на объектах строительства. По возможности проведение не только контроля качества бетона неразрушающими методами для определения прочности, но и дефектоскопии с использованием современных приборов и диагностического оборудования [7] для определения возможных дефектов на ранних стадиях их появления.

Вопросы защиты бетона от коррозии актуальны на протяжении многих лет и являются объектом научных исследований [2, 4]. С увеличением объема строительства монолитных ж/б зданий появляется больше возможностей для проведения анализа причин появления дефектов и наблюдения за их развитием во времени. Результаты исследований показывают, что при надлежащем контроле за коррозией бетона сокращается количество проблемных строительных объектов.

Список литературы

- 1. Гарькин, И.Н. Некоторые аспекты составления заключения по результатам строительного контроля / И.Н. Гарькин, Н.В. Агафонкина, В.А. Гарькина // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2020. № 4 (29). С. 147–151.
- 2. Розенталь, Н.К. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя / Н.К. Розенталь // Бетон и железобетон. 2012. №1 (6). С. 50–60.
- 3. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-18105-2010 (доступ свободный).
- 4. Рояк, Г.С. Предотвращение внутренней коррозии бетона / Г.С. Рояк // Научные труды ОАО ЦНИИС. М., 2003. Вып. №217.
- 5. Гарькин, И.Н. Деформативно-прочностные свойства монолитных железобетонных перекрытий / И.Н. Гарькин, Д.С. Саденко // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 1 (42). С. 126–129.
- 6. Касторных, Л.И. Контроль и оценка прочности бетона на заводах сборного и товарного бетона / Л.И. Касторных, И.В. Трищенко, М.А. Гикало // Инженерный вестник Дона. 2019. №4. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2320 (доступ свободный).
- 7. Логанина, В.И. Обеспечение качества и повышение конкурентоспособности строительной продукции: монография / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов. Пенза, 2014.

References

- 1. Garkin, I.N. Some aspects of drawing up an opinion on the results of construction control / I.N. Garkin, N.V. Agafonkina, V.A. Garkina // Education and Science in the Modern World. Innovations. 2020. No. 4 (29). P. 147–151
- 2. Rosenthal, N.K. Corrosion of concrete during the interaction of alkalis with silicon dioxide of the aggregate / N.K. Rosenthal // Concrete and reinforced concrete. -2012. No. 1. (6) P. 50-60.
- 3. GOST 18105-2010. Concretes. Rules of control and evaluation of strength. URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-18105-2010
- 4. Royak, G.S. Prevention of internal corrosion of concrete / G.S. Royak // Scientific works of JSC TsNIIS. M., 2003. Vol. 217.
- 5. Garkin, I.N. Deformative and strength properties of monolithic reinforced concrete floors / I.N. Garkin, D.S. Sadenko // Regional architecture and engineering. 2020. No. 1 (42). P. 126–129.
- 6. Kastorny, L.I. Monitoring and evaluation of the strength of concrete in factories of precast and ready-mixed concrete / L.I. Kastorny, I.V. Trishchenko, M.A. Gikalo // Don Engineering Newsletter. − 2019. − №4. − URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2320
- 7. Loganina, V.I. Quality assurance and increasing competitiveness of construction products: monograph / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov. Penza, 2014.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.543.3/9

Пензенский государственный университет Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Перелыгин Юрий Петрович,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия» E-mail: pyp@pnzgu.ru Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гришин Борис Михайлович,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» E-mail: bgrishin@rambler.ru

Салмин Сергей Михайлович,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника»

E-mail: sam14-08@mail.ru

Penza State University

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,

тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Perelygin Yuriy Petrovich,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the

department «Chemistry» E-mail: pyp@pnzgu.ru

Penza State University of Architecture

and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Grishin Boris Mikhailovich,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department «Water supply, sewerage and hydraulic engineering» E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Salmin Sergey Mikhailovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Water supply, sewerage and hydraulic engineering»

E-mail: sam14-08@mail.ru

УДАЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ АММИАКА ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И СТОЧНЫХ ВОД

Ю.П. Перелыгин, Б.М. Гришин, С.М. Салмин

Выполнен анализ методов удаления из водных растворов и сточных вод молекул аммиака и ионов аммония. Теоретически обоснованы и экспериментально (потенциометрическим методом) подтверждены зависимости относительной доли ионов NH_4^+ и связанных с водой молекул аммиака $NH_3\cdot H_2O$ от pH раствора. Найдены оптимальные значения pH раствора, при которых в присутствии ионов магния и гидрофосфата HPO_4^{-2} происходит наиболее полное удаление из водного раствора молекул аммиака и ионов NH_4^+ в виде магний-аммонийфосфата. Определена последовательность ввода реагентов, показан характер зависимости остаточной концентрации молекул NH_3 над осадком $MgNH_4PO_4$ от pH раствора. Теоретически обосновано максимальное значение pH (pH<10), при превышении которого растворимость магний-аммонийфосфата становится выше растворимости фосфата магния с переходом молекул NH_3 обратно в раствор или очищаемую сточную воду.

Ключевые слова: сточные воды, водные растворы, аммиак, ионы аммония, удаление азота, pH раствора

REMOVAL OF AMMONIA COMPOUNDS FROM AQUEOUS SOLUTIONS AND WASTE WATER

Yu.P. Perelygin, B.M. Grishin, S.M. Salmin

The analysis of methods for removing ammonia molecules and ammonium ions from aqueous solutions and wastewaters is made. The dependences on the pH of the solution of the relative fraction of NH₄⁺ ions and ammonia molecules NH₃·H₂O bound to water have been theoretically substantiated and experimentally confirmed (by potentiometric method). The optimal pH values of the solution were found, at which, in the presence of magnesium ions and HPO₄⁻² hydrogen phosphate, the most complete removal of ammonia molecules and NH₄⁺ ions from an aqueous solution in the form of magnesium ammonium phosphate occurs. The sequence of reagents introduction to water is determined, the character of the dependence of the residual concentration of NH₃ molecules over the MgNH₄PO₄ precipitate on the pH of the solution is shown. The maximum pH value (pH <10) is theoretically substantiated, above which the solubility of magnesium ammonium phosphate becomes higher than the solubility of magnesium phosphate with the transition of NH₃ molecules back into solution or treated waste water.

Keywords: waste water, aqueous solutions, ammonia, ammonium ions, nitrogen removal, solution pH

Водные растворы аммиака ($NH_3 \cdot H_2O$ или NH_4OH) достаточно широко используются в машиностроении и приборостроении для нанесения гальванических покрытий кадмием и цинком, а также при производстве печатных плат. Таким образом, в сточные воды предприятий, а затем и населенных пунктов, несмотря на работу локальных очистных сооружений предприятий, попадают аммиак и аммонийные комплексные соединения металлов – цинка, кадмия, меди и др.

Известны следующие методы удаления аммиака и аммонийного азота из сточных вод: биологические, физико-химические (в том числе сорбционные, ультрафиолетовое облучение, отдувка аммиака воздухом, ионный обмен) и химические (хлорирование, озонирование) [1, 2]. Эти методы достаточно эффективны, однако наряду с преимуществами имеют и свои недостатки.

Очистка сточных вод в аэротенках на станциях аэрации позволяет значительно снизить содержание общего и аммонийного азота, однако даже после полной биологической очистки в сточной воде остается до 15—20 мг/л аммонийного азота, а метод требует значительных площадей и не работоспособен при наличии тяжелых металлов.

За рубежом получил распространение метод отдувки аммиака воздухом. Этот метод предусматривает предварительный перевод растворенного аммонийного азота в аммиак NH_3 в результате повышения рН среды с последующей отдувкой его воздухом путем многократного разбрызгивания жидкости.

Доочистка сточных вод методом электрокоагуляции-флотации с использованием растворимых алюминиевых анодов и с предварительным хлорированием обеспечивает высокий эффект доочистки. При этом достигается снижение содержания NH_4^+ с 2,6 до 0,1 мг/л. Применение электролитического метода ограничивается из-за необходимости использования морской воды и мощных источников электроэнергии.

Проводятся работы по очистке сточных вод от азотсодержащих солей методом обратного осмоса. При этом вода фильтруется через специальные полупроницаемые мембраны, которые пропускают молекулы растворителя и задерживают молекулы или ионы растворенных веществ. При использовании целлюлозно-ацетатных мембран эффект очистки от соединений аммонийного азота составляет около 98,5 %.

Метод обратного осмоса эффективен только при тщательной предварительной очистке сточных вод от взвешенных веществ, ПАВ и умягчении воды для предотвращения образования карбоната кальция.

Очистка сточных вод с помощью катионита КУ-2 или цеолитов (природные и синтетические алюмосиликаты с некомпенсированными группами SiO_2) обеспечивает почти 100 %-е извлечение ионов аммония. Для очистки от аммонийного азота могут использоваться синтетические органические катионообменные смолы, но эти

смолы не дают необходимого эффекта ввиду малой емкости по иону аммония и быстрого загрязнения растворенными органическими веществами.

Использование ионного обмена возможно только в том случае, если раствор не содержит поверхностно-активные вещества.

Одним из широко применяемых методов очистки сточных вод с невысоким содержанием ионов аммония является окислительный метод, а также его использование в комбинации с биологической очисткой [3]. В качестве окислителей могут применяться озон и хлор, что связано, однако, с высокими затратами и повышенной опасностью.

В аналитической химии (Крешков А.П.) известен метод качественного обнаружения магния в виде магний-аммонийфосфата $MgNH_4PO_4$

$$Mg^{+2} + HPO_4^{-2} + NH_3 H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 + H_2O,$$
 (1)

который был исследован [4] для очистки сточных вод от аммония до норм, равных или меньших ПДК, при этом получаемый осадок магний-аммонийфосфата после его отделения может быть использован как комбинированное аммиачно-фосфатное удобрение.

Поскольку, по справочным данным, произведение растворимости $MgNH_4PO_4$ равно $2,5\cdot10^{-13}$ [5], т.е.

$$\Pi P(MgNH_4PO_4) = [Mg^{+2}] \cdot [HPO_4^{-2}] \cdot [NH_3 \cdot H_2O] = 2,5 \cdot 10^{-13},$$
(2)

то концентрация аммиака в воде в виде $NH_3 \cdot H_2O$ зависит от концентрации иона магния, гидрофосфат-иона (HPO_4^{-2}) и рН.

Однако вопрос теоретического обоснования оптимального значения pH, при котором происходит более полное удаление аммонийного азота, до настоящего времени не решен.

Как известно (Крешков А.П.), в водном растворе с участием ионов аммония NH_4^+ устанавливаются следующие равновесные реакции между ними и молекулами аммиака NH_3 и воды:

$$NH_4^+ + H_2O \leftrightarrow NH_3 \cdot H_2O + H^+,$$
 (3)

$$NH_3 H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^-.$$
 (4)

Константы равновесия данных реакций соответственно равны [5]:

$$K_1 = [NH_3 \cdot H_2 O][H^+]/[NH_4^+] = 5.75 \cdot 10^{-10},$$
 (5)

$$K_2 = [NH_4^+] \cdot [OH^-] / [NH_3 \cdot H_2 O] = 1,77 \cdot 10^{-5}.$$
 (6)

Совместное решение данных уравнений с уравнением материального баланса

$$[NH_3:H_2O] + [NH_4^+] = C$$
 (7)

позволило установить уравнения для расчета относительной доли (α) NH_4^+ и, следовательно, $NH_3^-H_2O$, как (1- α), от pH раствора:

Для проведения экспериментов растворы готовились из реактивов марок «х.ч.» или «ч.д.а.». Концентрация аммиака в растворе определялась по методике, изложенной в [6]. Определение рН растворов проводили потенциометрическим методом на приборе рН-340 с точностью ± 0.05 %.

Математическая обработка экспериментальных данных выполнялась с применением программы MathCAD.

На рис. 1 приведены зависимости относительной доли (α) NH₄⁺ (кривая 2) и NH₃ H₂O (кривая 1) от рН раствора. При повышении рН до 6-7 относительная доля содержания иона аммония в растворе близка к единице, а NH₃ H₂O близка нулю. При

более высоком значении pH раствора увеличивается относительная доля $NH_3 \cdot H_2O$ и при pH более 12 равна единице, тогда как относительная доля иона аммония уменьшается и при pH более 12 близка к нулю. Равенство относительных долей $NH_3 \cdot H_2O$ и NH_4^+ в растворе имеет место при pH, равном 9,24.

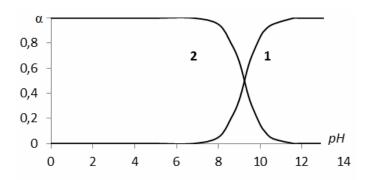


Рис. 1. Зависимость относительной доли $NH_4^+(2)$ и $NH_3:H_2O(1)$ от pH раствора

Следует отметить, что метод прямой потенциометрии с использованием ионоселективного пленочного электрода, например ЭЛИС – $121\mathrm{NH_4}$ (паспортом рекомендован для определения иона аммония в диапазоне pH = 2...10), не может быть использован при pH более 8, т.к. при данных значениях pH, что видно из рис. 1, часть иона аммония $\mathrm{NH_4}^+$ перешла в $\mathrm{NH_3}^+\mathrm{H_2O}$.

В свою очередь концентрация гидрофосфат-иона $[HPO_4^{-2}]$ также зависит от pH раствора. Для нахождения оптимального значения pH раствора, при котором происходит наиболее полное выпадение осадка магнийаммонийфосфата, целесообразно определить состояние ионов ортофосфорной кислоты в растворе в зависимости от pH. Ортофосфорная кислота является трехосновной кислотой, которая диссоциирует следующим образом:

$$H_3PO_4 \leftrightarrow H_2PO_4^- + H^+, \tag{9}$$

$$H_2PO_4^- \leftrightarrow HPO_4^{-2} + H^+,$$
 (10)

$$HPO_4^{2-} \leftrightarrow PO_4^{-3} + H^+. \tag{11}$$

Константы диссоциации ортофосфорной кислоты соответственно равны $1,1\ 10^{-2},\ 2\ 10^{-7}$ и $3,6\ 10^{-13}$ [5]. Таким образом, можно получить следующие уравнения:

$$K_1 = [H_2PO_4^-] \cdot [H^+] / [H_3PO_4] = 1, 1 \cdot 10^{-2},$$
 (12)

$$K_2 = [HPO_4^{-2}] \cdot [H^+] / [H_2PO_4^-] = 2 \cdot 10^{-7},$$
 (13)

$$K_3 = [PO_4^{-3}] \cdot [H^+] / [HPO_4^{2-}] = 3,6 \cdot 10^{-13},$$
 (14)

$$[H_3PO_4] + [H_2PO_4] + [HPO_4] + [PO_4] = C_K,$$
 (15)

где C_{κ} – общая концентрация кислоты в растворе (моль/л).

Совместное решение данных уравнений позволяет установить зависимость относительной доли (β) ортофосфорной кислоты и ее ионов от pH раствора. Результаты расчетов, выполненных с применением программ MachCAD, приведены на рис.2.

В водном растворе, содержащем ионы магния и фосфорной кислоты, помимо образования магний-аммонийфосфата протекают следующие реакции:

$$Mg^{2+} + 2 OH^{-} = Mg(OH)_{2},$$
 (16)

$$3Mg^{2+} + 2PO_4^{3-} = Mg_3(PO_4)_2. (17)$$

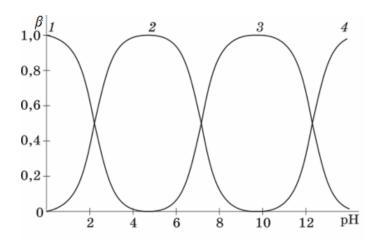


Рис. 2. Зависимость относительной доли (β) H_3PO_4 (кривая 1), H_2PO_4 (кривая 2), HPO_4^{-2} (кривая 3) и PO_4^{-3} (кривая 4) от pH раствора при общей концентрации кислоты 0,01 моль/л

Начало осаждения гидроксида магния зависит от концентрации ионов магния и pH раствора. Так, по данным Ю.Ю. Лурье, при концентрации магния 1 и 0,01 моль/л pH начала осаждения соответственно равны 9,4 и 10,2. Поскольку произведение растворимости $Mg(OH)_2$ (6,8·10⁻¹² [5]) больше произведения растворимости $MgNH_4PO_4$, то в первую очередь выпадает в осадок $MgNH_4PO_4$.

При pH более 10, когда в растворе появляются фосфат-ионы (см. рис. 2), происходит образование и выпадение в осадок $Mg_3(PO_4)_2$, произведение растворимости $(3,9\cdot10^{-26})$ которого значительно меньше произведения растворимости $MgNH_4PO_4$ $(2,5\cdot10^{-13})$ [5]. В данном случае из $MgNH_4PO_4$ с течением времени может происходить образование $Mg_3(PO_4)_2$ и выделение аммиака в раствор в виде $NH_3\cdot H_2O$.

Совместный анализ данных, приведенных на рис. 1 и 2, а также сведения о возможности образования гидроксида магния и фосфата магния позволяют сделать следующие заключения:

- одновременное наличие ионов магния, ионов гидрофосфата и аммиака в виде NH₃·H₂O наблюдается при pH раствора более 7;
- повышение pH раствора приводит к увеличению концентрации ионов гидрофосфата и NH_3 : H_2O , что способствует более значительному удалению аммиака из раствора;
- соли магния целесообразно вводить в раствор, содержащий аммиак, гидрофосфат натрия, после доведения его рН щёлочью до величины более 8. Только в этом случае происходит образование магний-аммонийфосфата, а не гидроксида магния;
- увеличение рН более 10 не целесообразно, т.к. в этом случае возможно образование фосфата магния.

В таблице приведена зависимость концентрации молекул аммиака в виде $NH_3 \cdot H_2O$ от pH раствора над осадком. Из данной таблицы видно, что концентрация аммиака с ростом pH уменьшается, причем при pH более 8,5 концентрация аммиака в растворе не превышает ΠJK (1 мг/л).

Зависимость концентрации аммиака над осадком MgNH₄PO₄ от pH раствора

	рН	7,5	8	8,5	9	10
Γ	Концентрация [NH ₃], мг/л	4,5	1,3	0,4	0,2	0,09

Выводы

1. При значении pH 8-9 происходит удаление аммиака и ионов аммония из отработанных растворов и сточных вод в виде $MgNH_4PO_4$ до норм, равных или меньших

- ПДК, а получаемый осадок магний-аммонийфосфата после его отделения может быть использован как комбинированное аммиачно-фосфатное удобрение.
- 2. Соли магния целесообразно вводить в раствор, содержащий аммиак, гидрофосфат натрия и гидроксид натрия, при pH, равном 8–9, поскольку произведение растворимости магний-аммонийфосфата в данном диапазоне pH меньше произведения растворимости гидроксида магния.
- 3. Повышение pH отработанных растворов и сточных вод, содержащих молекулы NH_3 , до значений более 10 не целесообразно, так как это приводит к значительному расходу щелочи и к возможности перехода $MgNH_4PO_4$ в $Mg_3(PO_4)_2$ с выделением аммиака в водный раствор, что снизит эффективность последующей очистки отработанных растворов и сточных вод от ионов аммония и молекул NH_3 .

Список литературы

- 1. Харькина, О.В. Проблемы проектирования сооружений биологической очистки с удалением азота и фосфора /О.В. Харькина // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. №5. С. 4–15.
- 2. Кофман, В.Я. Современные способы удаления азота из сточных вод (обзор) / В.Я. Кофман // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. №5. С. 44–53.
- 3. Гришин, Б.М. Удаление аммонийного азота из городских сточных вод с применением физико-химического и биологического методов/ Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, А.Н. Кошев, Ю.П. Перелыгин// Региональная архитектура и строительство. − 2020. − №2. − С. 134–141.
- 4. Перелыгин, Ю.П. Реагентная технология утилизации высококонцентрированных растворов, содержащих ионы цинка, кадмия или меди и аммония / Ю.П. Перелыгин, О.В. Зорькина, А.А. Флягин, Т.В. Зуева // Региональная архитектура и строительство. − 2009. №1. С. 87–91.
- 5. Константы неорганических веществ: справочник / Р.А. Лидин, Л.Л. Андреева, В.А. Молочко; под ред. Р.А. Лидина. М.: Дрофа, 2006. 685 с.
- 6. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в очищенных сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. ПНД Φ 14.1.1–95. M., 2001. 12 с.

References

- 1. Kharkina, O.V. Problems of designing biological treatment facilities with nitrogen and phosphorus removal / O.V. Kharkina // Water supply and sanitary equipment. 2019. No. 5. P. 4–15.
- 2. Kofman, V.Ya. Modern methods of nitrogen removal from wastewater (review) / V.Ya. Kofman // Water supply and sanitary equipment. 2019. No. 5. P. 44–53.
- 3. Grishin B.M. Removal of ammonium nitrogen from urban waste water using physicochemical and biological methods / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, A.N. Koshev, Yu.P. Perelygin // Regional architecture and engineering. -2020.-N2.-P.134-141.
- 4. Perelygin, Yu.P. Reagent technology for the disposal of highly concentrated solutions containing ions of zinc, cadmium or copper and ammonium / Yu.P. Perelygin, O.V. Zorkina, A.A. Flyagin, T.V. Zueva // Regional architecture and engineering. − 2009. − №1. − P. 87–91.
- 5. Constants of inorganic substances: Handbook / R.A. Lidin, L.L. Andreeva, V.A. Milk; ed. R.A. Lidina. M.: Drofa, 2006. 685 p.
- 6. Methods for measuring mass concentration of ammonium ions in treated wastewater by photometric method with Nessler's reagent. PND F 14.1.1–95. M., 2001. 12 p.

УДК 519.87: 697.92

Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 18,

тел.: (383) 332-40-02; факс: (383) 332-28-47

Варенцов Валерий Константинович,

доктор технических наук, профессор E-mail:vvk@ngs.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Кузина Валентина Владимировна,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационновычислительные системы» E-mail: kuzina@pguas.ru

Кошев Александр Николаевич,

доктор химических наук, профессор, действительный член Нью-Йоркской Академии наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»

E-mail: koshev@pguas.ru

Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Russia, 630128 Novosibirsk, 18, Kuateladze St..

tel.: (383) 332-40-02; fax: (383) 332-28-47

Varentsov Valery Konstantinovich,

Doctor of Sciences, Professor

E-mail: vvk@ngs.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Kuzina Valentina Vladimirovna,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Information and Computing Systems»

E-mail: kuzina@pguas.ru

Koshev Alexander Nikolaevich,

Doctor of Chemistry Science, Professor, Full Member of the New York Akademy of Sciences, Professor of the department «Information and Computing Systems» E-mail: koshev@pguas.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА В ПРОТОЧНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

В.К. Варенцов, В.В. Кузина, А.Н. Кошев

Предложено описание использования прогрессивных технологий для извлечения ионов тяжелых и цветных металлов из сточных вод промышленных предприятий, в частности предприятий, использующих гальванические производства. Рассмотрены вопросы анализа применимости проточных трехмерных электродов для очистки сточных вод от вредных реагентов на основе математического моделирования процессов массопереноса. Описаны принципы математического моделирования процессов в трехмерных проточных электродах, представлены моделирующие уравнения и граничные соотношения.

Ключевые слова: очистка сточных вод, математическое моделирование процессов массопереноса, объемно-пористые катоды (трехмерные пористые электроды)

MODELING OF MASS TRANSFER PROCESSES IN FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODES OF WASTE WATER

V.K. Varentsov, V.V. Kuzina, A.N. Koshev

The description of the use of advanced technologies for the extraction of ions of heavy and nonferrous metals from wastewater of industrial enterprises, in particular, enterprises using galvanic production, is proposed. The article deals with the analysis of the applicability of three-dimensional flow electrodes for purification of wastewater from harmful reagents on the basis of mathematical modeling of mass transfer processes. The principles of mathematical modeling of processes in three-dimensional flow electrodes are described, modeling equations and boundary relations are presented.

Keywords: wastewater treatment, mathematical modeling of mass transfer processes, volumetric porous cathodes (three-dimensional porous electrodes)

Одними из самых опасных с экологической точки зрения являются технологии, связанные с гальваническим производством – поставщиком ионов тяжелых и цветных металлов в сточные воды предприятий. Согласно шкале стрессов-факторов, по воздействию на человеческий организм ионы тяжелых металлов выходят на первое место (135 баллов), значительно опережая разливы нефти (72 балла), химические удобрения (63 балла), радиоактивные отходы (40 баллов) и шум (15 баллов). Подтверждением большой экологической опасности гальванического производства являются директивы Европейской комиссии SevesoII, касающиеся электролитов, содержащих хром (+6), и запрета ЕС на использование свинца при производстве электрического или электронного оборудования [1].

Основные металлы, используемые в гальванотехнике, — это цинк, медь, никель, хром, олово и кадмий; около 25 % приходится на покрытие благородными металлами.

Гальваническое производство тесно связано с потреблением воды в качестве технологического сырья. Качество и надежность гальванопокрытий определяется эффективностью промывки деталей от компонентов основных электролитов, поэтому основным потребителем воды являются промывочные операции (до 90–95 %). Расход воды на каждую технологическую операцию (обезжиривание, травление, нанесение функциональных покрытий, вспомогательные процессы обработки) составляет 0,2–0,5 л/м² и более [2]. Кроме того, в гальванике вода используется на ряд других технологических операций: приготовление технологических растворов, охлаждение оборудования и растворов, промывку оборудования и т.д. Именно промывные воды являются главным источником загрязнений, исходящих от гальванических производств.

Гальванические производства являются одними из наиболее реагентно- и водопотребляемых, причем степени полезного использования тяжелых металлов здесь очень низки и составляют около 30–40 %. Основные потери тяжелых металлов приходятся на операции промывки изделий. Технологические процессы характеризуются большим расходом питьевой и деионизированной воды (значительно больше, чем за рубежом). В регионах с развитым гальваническим производством концентрация соединений цветных металлов в водоемах и почве превышает допустимые нормы в десятки и сотни раз. При этом основным источником экологической опасности являются промывные растворы и отработанные электролиты, с которыми теряется в несколько раз больше металлов, чем тратится на покрытия.

Более 90 % стоков обезвреживается непосредственно на предприятиях, причем наиболее распространены реагентные методы обезвреживания гидроксидом кальция, бисульфитом или гипохлоритом натрия. Их использование для обработки общего стока приводит к образованию значительных объемов шламов и увеличению содержания солей в сточных водах. Потери реагентов и материалов при такой очистке больше, чем без нее.

Источниками загрязнения в гальванотехнике являются не только промывные воды, но и отработанные концентрированные растворы. Выход сырья рабочих растворов происходит по причинам накопления в электролитах посторонних органических и неорганических веществ, а также нарушения соотношения основных компонентов гальванических ванн. К наиболее опасным загрязнителям относятся стойкие органические вещества, а также комплексные соединения цветных и тяжелых металлов. Их выбросы нарушают естественный баланс веществ в природной водной среде, приводя к необратимому нарушению процессов самоочищения.

Электрохимическая технология, наряду с другими методами очистки сточных вод, такими, как баромембранный, ионообменный и др., может стать основой для создания экологически более чистых гальванохимических производств (ГХП).

Экологическая опасность гальванического производства определяется главным образом вредным воздействием сточных вод, содержащих компоненты технологических растворов, на поверхностные водоемы. К превышению предельно допустимых концентраций (ПДК) металлов в сточных водах приводят залповые сбросы электролитов в гальванических производствах. Проблема залповых сбросов в гальванотехнике обусловлена так называемой «технической усталостью» растворов. Такого рода сбросы приводят к большим расходам воды, нарушению работы очистных сооружений, резкому повышению ПДК в сточных водах. Причины ухудшения работы электролитов обычно связаны с накоплением в них неорганических и органических примесей, вносимых с реагентами, или продуктов электродных реакций. Кондиционирование электролитов, их повторное использование — один из возможных путей решения вопросов создания замкнутых технологических процессов.

В настоящее время не существует единого метода, который обеспечивал бы создание замкнутых технологических схем в гальванотехнике. Прогрессивным направлением решения этой проблемы является локальная переработка растворов с использованием комбинированных схем, включающих современные физико-химические методы, например, такие, как ионный обмен, электролиз с трехмерными электродами, обратный осмос, электродиализ, электрофлотация. Выбор метода или их комбинации требует индивидуального подхода с учетом экономических факторов, наличия промышленного оборудования, а также возможности реализации разработанной схемы в реальных условиях производства.

Электрохимические процессы удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к процессам, разрабатываемым для извлечения металлов из растворов гальванопроизводств: они не требуют использования реагентов; металл получается в наиболее чистом концентрированном виде и может в большинстве случаев возвращаться в производство; легко реализуется возможность автоматизации процесса; сокращается расход воды и т.д. Использованию этих процессов препятствовало отсутствие высокопроизводительной аппаратуры, позволяющей создавать компактные установки. В настоящее время существует большое число конструктивных решений электрохимических реакторов — от простых пластинчатых электродов до сложных трехмерных систем, обеспечивающих значительную интенсификацию электрохимических процессов, что особенно важно для растворов с низкой концентрацией электроактивных компонентов, аналогичных сточным водам.

В настоящее время появляется большое количество работ, посвященных использованию трехмерных электродов (ПТЭ) для извлечения ионов тяжелых и цветных металлов из растворов гальванических производств и сточных вод. Это связано с тем, что применение технологий на основе ПТЭ позволяет значительно интенсифицировать электрохимические процессы, особенно в растворах с низкими концентрациями электроактивных компонентов, что достигается прежде всего благодаря их высокой реакционной поверхности и интенсивному массопереносу [3].

Одним из прогрессивных методов анализа применимости ПТЭ для очистки сточных вод от вредных реагентов является исследование электрохимических процессов на основе математического моделирования.

Рассмотрим основные электрохимические процессы, протекающие в объеме проточного трехмерного электрода, и их математические описания. Будем считать, что поток заряженных частиц i-го сорта N_i ($i=1,\ldots,n$) в объеме электролита определяется миграционной и конвективной составляющими, что реализуется в большинстве электрохимических систем [3]:

$$N_i = z_i u_i F C_i \nabla E + C_i V. \tag{1}$$

Здесь z_i , C_i , u_i — соответственно заряд, концентрация и подвижность i-го электроактивного компонента в псевдогомогенной среде; ∇E — градиент потенциала электрического поля; V — вектор скорости конвективного переноса раствора.

Ток в объеме электрод – электролит выражается формулой

$$j = F \sum z_i N_i. \tag{2}$$

Условие материального баланса в отсутствие гомогенной электрохимической реакции:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \bullet N_i , \qquad (3)$$

где $\nabla \bullet N_i$ – дивергенция потока N_i .

Если система стационарна, то

$$\nabla \bullet N_i = 0. (4)$$

Из (1) и (2) следует, что $j = F^2 \sum z_i^2 u_i C_i \nabla E + FV \sum z_i C_i$ или $j = \kappa \nabla E + FV \sum z_i C_i$, где $\kappa = F^2 \sum z_i^2 u_i C_i$ — проводимость среды, которую можно считать постоянной, если изменения концентраций электроактивных компонентов не оказывает на ее величину существенного влияния (например, в присутствии фонового электролита).

Умножая каждый член равенства (4) на $z_i F$ и суммируя по i, совместно с формулой (2), получаем: $\nabla \bullet j = 0$ или $\nabla \bullet \left\lceil \kappa \nabla E + FV \sum_i z_i C_i \right\rceil = 0$.

Естественно предположить в такой модельной среде наличие скачка потенциала на границе твердый электрод — электролит в каждом элементарном объеме электродного пространства, где возможны электродные реакции. Реализация такого предположения приводит нас к следующей системе уравнений в частных производных:

$$Fz_{i}\frac{\partial C_{i}}{\partial t} = -\nabla \bullet \left(z_{i}^{2}F^{2}u_{i}C_{i}\nabla E + Fz_{i}C_{i}V\right). \tag{5}$$

Составим сумму уравнений (5) при i = 1, ..., n:

$$F\frac{\partial \sum z_i C_i}{\partial t} = \nabla \bullet \left[-\kappa \nabla E \right] - F \nabla \bullet \left[V \sum z_i C_i \right]. \tag{6}$$

Если удалить из сумм в правой и левой частях уравнения (6) слагаемые $z_i C_i$, соответствующие компонентам электролита, не участвующим в электрохимических реакциях, то получим соотношение с суммированием электроактивных компонентов, участвующих в реакциях, по индексам k:

$$F\frac{\partial \sum z_k C_k}{\partial t} = \nabla \bullet \left[-\kappa \nabla E \right] - F \nabla \bullet \left[V \sum z_k C_k \right]. \tag{7}$$

Учитывая очевидное соотношение

$$\sum \left(\frac{\partial C_k}{\partial x_k} V_x + \frac{\partial C_k}{\partial y} V_y + \frac{\partial C_k}{\partial z} V_z \right) =$$

$$\sum |V| \left(\frac{\partial C_k}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial C_k}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial C_k}{\partial z} \cos \gamma \right) = \sum |V| \frac{\partial C_k}{\partial r},$$
(8)

где r — направление протока раствора, нетрудно получить следующее соотношение:

$$\frac{\partial C_k}{\partial r} = -\frac{S}{|V|z_k F} j_{S_k},\tag{9}$$

где S — реакционная поверхность; j_{Sk} — плотность поляризующего тока по k-му компоненту.

Подстановка формул (8) и (9) в уравнение (7), а также соотношения $\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_{_{\rm T}} + \rho_{_{\rm K}}}, \; \rho_{_{\rm T}} = \frac{1}{\kappa_{_{\rm T}}}, \; \rho_{_{\rm K}} = \frac{1}{\kappa_{_{\rm K}}} \; \text{приводят к уравнению}$

$$F \frac{\partial \sum z_k C_k}{\partial t} = \nabla \bullet \left[-\frac{\kappa_{_{\mathrm{T}}} \kappa_{_{_{\mathcal{K}}}} \nabla E}{\kappa_{_{\mathrm{T}}} + \kappa_{_{_{\mathcal{K}}}}} \right] + S \sum j_{Sk} . \tag{10}$$

Система уравнений (8), (9) должна быть дополнена кинетическими уравнениями, связывающими j_{Sk} и E [3]:

$$j_{S_k}(x) = j_{0k} \frac{e^{\alpha_k z_k F((E - \phi_{Rk})/RT} - e^{(\alpha_k - 1)z_k F(E - \phi_{Rk})/RT}}{1 + j_{0k} e^{\alpha_k z_k F(E - \phi_{Rk})/RT} / z_k FK_m C_k}.$$

Совместно с естественными граничными условиями:

$$\frac{\partial E}{\partial n}(t)\Big|_{\sigma_{\rm K}} = J(t)\rho_{\scriptscriptstyle \rm T}; \ \, \frac{\partial E}{\partial n}(t)\Big|_{\sigma_{\scriptscriptstyle \rm A}} = -J\left(t\right)\rho_{\scriptscriptstyle \rm K}; \ \, \frac{\partial E}{\partial n}(t)\Big|_{\sigma_{\scriptscriptstyle \rm H}} = 0; \ \, C(t)\Big|_{\sigma_{\scriptscriptstyle \rm II}} = C_0 \,, \label{eq:continuous}$$

где n — направление нормали к границе реакционной области $\sigma = \sigma_{\rm K} + \sigma_{\rm A} + \sigma_{\rm U} + \sigma_{\rm II}$, система (10) дает возможность рассчитывать распределение потенциала, плотности тока и концентрации электроактивного вещества в объеме пористого электрода.

Для проведения вычислительных экспериментов разработан комплекс программ, позволяющий рассчитывать параметры электрохимического процесса осаждения металлов из растворов электролитов на проточный электрод из УВМ. Входными данными для расчета являются параметры осаждаемого компонента (валентность ионов, коэффициент диффузии), концентрация осаждаемого компонента в растворе, скорость протока раствора, коэффициент массопереноса, электропроводность твердой и жидкой фаз системы электрод – раствор, габаритная плотность тока, параметры электрода (пористость, радиус волокна, толщина электрода), время электролиза. Входные данные хранятся в файле данных и могут редактироваться пользователем в оболочке программы.

Результатами расчета являются: концентрации ионов металлов (расчет может вестись для одного или двух ионов металлов, содержащихся в растворе), распределение по толщине (объему) электрода электропроводности металлов, скорости протока электролита, коэффициентов массопереносов металлов, потенциала, профилей тока по металлам, профиля тока по кислороду, профиля тока по водороду, приведенного профиля тока по металлам.

Результаты расчёта сохраняются в текстовом файле с именем, заданным пользователем.

Описанные математические модели и программные комплексы используются нами при решении задач по определению оптимальных технологических параметров процессов извлечения металлов, в частности, из отработанных растворов гальванических производств.

Список литературы

- 1. Перелыгин, Ю.П. Некоторые вопросы экологии гальванического производства / Ю.П. Перелыгин // Гальванотехника и обработка поверхности. 2018. Т. 26, № 2. С. 57—61.
- 2. Ковалева, О.В. Комбинированные физико-химические методы обработки техногенных сточных вод: дис. ... доктора хабилитат химических наук: [специальность] 145.01 Экологическая химия / Ковалева Ольга Викторовна; Акад. наук Молдовы, Интхимии. Кишинэу, 2016. 242 с.
- 3. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС, 2020. 172 с.

References

- 1. Perelygin, Yu.P. Some questions of ecology of galvanic production / Yu.P. Perelygin // Electroplating and surface treatment. 2018. Vol. 26, No. 2. P. 57–61.
- 2. Kovaleva, O.V. Combined physicochemical methods of processing industrial wastewater: dis. ... doctors habilitat of chemical sciences: [specialty] 145.01 Environmental chemistry / Olga V. Kovaleva; Acad. Sciences of Moldova, Institute of Chemistry. Chisinau, 2016. 242 p.
- 3. Redox processes on three-dimensional flow electrodes. Mathematical modeling. Theory. Experiment: monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova, V.V. Kuzina. Penza: PSUAC, 2020. 172 p.

УДК 698

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Ерёмкин Александр Иванович,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»

E-mail: eremkin@pguas.ru

Петрова Ксения Александровна,

магистрант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Багдасарян Алена Гарушевна,

магистрант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Пензенский государственный аграрный университет

Россия, 440014, г. Пенза, ул. Ботаническая, д.30,

тел.: (8412) 628-359; факс: (8421) 628-354

Пономарева Инна Константиновна,

кандидат экономических наук, доцент кафедры «Организация и автоматизация производства» E-mail: inna.ok007@rambler.ru Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Eremkin Alexander Ivanovich,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department «Heat, Gas Supply and Ventilation» E-mail: eremkin@pguas.ru

Petrova Kseniya Aleksandrovna,

Undergraduate of the department «Heat and Ventilation»

Bagdasaryan Alyona Garushevna,

Undergraduate of the department «Heat and Ventilation»

Penza State Agrarian University

Russia, 440014, Penza, 30, Botanicheskaya St.,

tel.: (8412) 628-359; fax: (8412) 628-354

Ponomareva Inna Konstantinovna,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Organization and Automation of Production» E-mail: inna.ok007@rambler.ru

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МИКРОКЛИМАТА В ЗАЛЕ БОГОСЛУЖЕНИЯ СПАССКОГО КАФЕДРАЛЬНОГО СОБОРА Г. ПЕНЗЫ

А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К. А. Петрова, А. Г. Багдасарян

Проведение обрядов в зале богослужения собора сопровождается значительным выделением различных вредностей от прихожан и персонала (теплота, водяной пар, углекислый газ), при сжигании свечей, от применения кадил и лампад (теплота, углекислый газ, гарь, сажа, копоть, водяной пар), от освещения и солнечной радиации через наружные ограждения (теплота). Для улавливания и удаления выделяющихся вредностей при сгорании свечей в зале богослужения предложена местная вытяжная система вентиляции с применениями зонтов, установленных над столешницей подсвечника.

Ключевые слова: кондиционирование воздуха, вытесняющая вентиляция, воздухообмен, православный собор, зал богослужения, восходящий конвективный тепловой поток, температура, относительная влажность, подвижность воздуха, микроклимат, зонты, местная вентиляция, свеча, подсвечник, столешница

QUALITY IMPROVEMENT OF MICROCLIMATE IN THE SPASSKY CATHEDRAL IN PENZA

A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova, A.G. Bagdasaryan

Carrying out rituals in the church's hall of worship is accompanied by a significant release of various harmful substances from parishioners and staff (heat, water vapor, carbon dioxide), when burning candles, from the use of censers and lamps (heat, carbon dioxide, fumes, soot, soot, water vapor), from consecration and solar radiation through external enclosures (heat). In the article, a local

exhaust ventilation system with the use of umbrellas installed above the candlestick tabletop is proposed for trapping and removing harmful emissions from burning candles in a worship hall.

Keywords: air conditioning, displacement ventilation, air exchange, Orthodox cathedral, worship hall, ascending convective heat flux, temperature, relative humidity, air mobility, microclimate, umbrellas, local ventilation, candle, candlestick, countertop

Для расчета воздухообменов важно иметь данные о количестве вредностей, выделяющихся в зале богослужения собора. Известно, в центральной части собора в теплый период года в зале богослужения при допустимой температуре внутреннего воздуха от 12 до 16 °C и оптимальной температуре от 14 до 16 °C один человек выделяет в среднем до 50 г/ч водяного пара. В холодный период года при допустимой температуре внутреннего воздуха в зале богослужения от 12 до 16 °C и оптимальной 14 до 16 °C каждый прихожанин выделяет в среднем до 40 г/ч водяного пара. Тепловыделения от одного человека по полной теплоте достигают в теплый период года до 80 Вт, а в холодный – до 100 Вт [1, 2, 3, 4, 5].

При расчете воздухообмена в зале богослужения (выделения теплоты $Q_{\rm явн}$, $Q_{\rm пол,}$ Вт, влаги $G_{\rm w}$, г/ч, одним человеком) предлагается использовать данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 Расчетные значения выделяющихся вредностей от человека

]	10, °C	7	1	.5, °C	1	2	20, °C	7	2	25, °C		3	0, °C			35, °C	7
Выде- ление СО _{2,} л/ч	$Q_{\scriptscriptstyle{\mathrm{ЯВН}}}$, BT	$Q_{ m non}, { m BT}$	$G_{w, \Gamma/\mathbf{q}}$	$Q_{\scriptscriptstyle{\mathrm{ЯВH}}}$, Вт	$Q_{ ext{non}, ext{BT}}$	$G_{w,\Gamma}/\mathbf{q}$	$Q_{\scriptscriptstyle{\mathrm{ЯВH}},}\mathrm{BT}$	$Q_{ m non,BT}$	$G_{w,\Gamma}/\mathbf{q}$	$Q_{_{\mathrm{ЯВН}}}$, ВТ	$Q_{ m non,BT}$	$G_{w,\Gamma}/\mathbf{q}$	$Q_{_{\mathrm{ABH}}}$, BT	$Q_{ ext{non}, ext{BT}}$	$G_{w,\Gamma}/{ m H}$	$Q_{_{\mathrm{ЯВН}}}$, Вт	$Q_{ m non}, { m BT}$	$G_{\mathrm{w,}}$ Γ/H
23	140	165	30	120	145	30	90	120	40	60	95	50	40	95	75	10	95	115

В расчетах табличные данные необходимо использовать с учетом влияния одежды и соответствующих поправочных коэффициентов, приведенных в стандартах [1–4].

Количество углекислого газа, выделяемого одним человеком, составляет 23 л/ч. Допустимая концентрация CO_2 в удаляемом воздухе регламентируется до 2 л/м³, а в приточном воздухе – от 0,33 до 0,5 л/м³, в зависимости от величины населенного пункта или большого города [1, 2, 10, 11].

При сжигании свечей выделяются водяной пар (до 1,3 кг/ч парафина), углекислый газ (1650 л/кг парафина), а также сажа и копоть, которые переносятся в объеме зала богослужения конвективными и вентиляционными потоками [1, 2, 8, 11]. По данным [1, 2, 4, 10], для проектирования воздухообмена в соборе расход сжигаемых свечей принимается в зависимости от количества прихожан. При 60 человек используется свечей 0,5 кг/ч, 300 человек – 1,5 кг/ч, 600 человек – 1,55 кг/ч.

При выполнении расчетов воздухообменов в зале богослужения предполагается использовать данные, приведенные в [10–12], в зависимости от типа и номера свечей. Размеры и масса одной свечи приведены в табл. 2.

Таблица 2 Параметры свечей, производимых из 1 кг парафина

№	Количество свечей	Масса одной	Высота одной	Время горения
свечи	в пачке, шт	свечи, г	свечи, см	одной свечи, мин
20	50	20	30	180
40	100	10	26	90
80	200	5	18	55
120	300	3,3	15,5	45
140	350	2,86	15	40

От размера и массы свечей зависят время сгорания свечи и количество выделяемых продуктов сгорания. Сведения представлены в табл. 3 [10].

Таблица 3

Показатели	процесса	горения	перковных	свечей
Hokusuresin	процесси	торсиил	церковных	CBC ICH

№		выделения рении, Вт	Влаговь	иделения, кг/ч	Поступление СО2. л/ч		
свечи	1 кг	одной свечи	1 кг	одной свечи	1 кг	одной свечи	
20	4334	86,7	0,433	0,0087	550	11	
40	8669	86,7	0,867	0,0087	1100	11	
80	14185	70,9	1,418	0,0071	1799	9,0	
120	17337	57,8	1,733	0,0058	2200	7,3	
140	19504	55,7	1,949	0,0057	2474	7,1	

Расход свечей в зале богослужения собора в зависимости от числа гнезд в столешнице подсвечника приведен в табл. 4 [10].

Таблица 4 Приближенное значение расхода свечей в соборе

Общая численность гнезд на столешницах	Расход свечей, кг
до 100	0,5
101-200	0,5-0,8
201-350	0,9-1,5
351-450	1,6-2,0
451-650	2,1-2,5
651-750	2,6-3,0
св. 750	св. 3,5

В залах богослужения соборов свечи размещаются в основном на столешницах подсвечников и находятся в руках прихожан. Подсвечники не имеют постоянного места установки и перемещаются по площади зала богослужения. Обследование соборов показало, что сажа (копоть) в результате горения свечей оседает на стенах зала, иконах, росписи произведений станковой живописи, потолках, сводах, архитектурных элементах, на позолоте. В результате воздействия дыма и копоти внутреннее убранство зала богослужения становится темным и закопченным, от дыма затрудняется дыхание прихожан [12, 13, 16, 17, 18].

Для устранения негативного влияния продуктов сгорания от парафиновых свечей на микроклимат зала богослужения, по данным стандартов и научных работ, в настоящее время применяются в основном естественная и механическая вентиляция, а также кондиционирование воздуха. Наряду с этим, задача системы вентиляции и кондиционирования — обеспечить расчетные параметры внутреннего воздуха, приведенные в табл. 1 [1, 2, 5, 6, 12–18]

С целью сокращения поступления в зал богослужения продуктов сгорания от парафиновых свечей авторами статьи, наряду с общеобменной вентиляцией, предлагается применить местное улавливание и удаление вредных веществ непосредственно в зоне сгорания свечей над подсвечниками. Технические решения и теоретические исследования в настоящее время в данной области отсутствуют, нет рекомендаций по инженерному проектированию местной вытяжной системы вентиляции для удаления продуктов сгорания свечей за пределы зала богослужения. Были предприняты попытки решения проблемы местной вентиляции для удаления продуктов сгорания от свечей над подсвечниками (см. патент RU 26366 U1, F21V35/00 от 04.06.2002 и патент Болгарии BG 1299 U1, F21V35/00 от 05.06.2009).

Имеющиеся данные в патентах носят описательный характер и не позволяют применять их в инженерной практике.

Для решения поставленной задачи авторы статьи использовали результаты известных теоретических исследований и инженерные решения в области вентиляции, теплотехники и тепломассообмена [7, 14, 15]. Предлагается для улавливания вредностей

от сгорания свечей в зале богослужения собора применять местные отсосы в виде зонта над столешницей подсвечника. Местный отсос в виде зонта служит для локализации вредных выделений в местах их образований и удаления загрязненного воздуха за пределы зала богослужения через систему местной вентиляции. Зонт препятствует проникновению продуктов сгорания от свечи в зону нахождения прихожан.

Для практического применения рекомендуются разные решения установки местных отсосов для удаления дыма, копоти, гари и других вредных продуктов сгорания свечи в реконструируемых, восстановленных и вновь строящихся соборах.

Для вновь строящихся соборов в стадии проектирования предлагается условная схема вытяжной вентиляции (рис. 1), где вытяжной воздуховод располагается в каналах или подвалах под пологом.

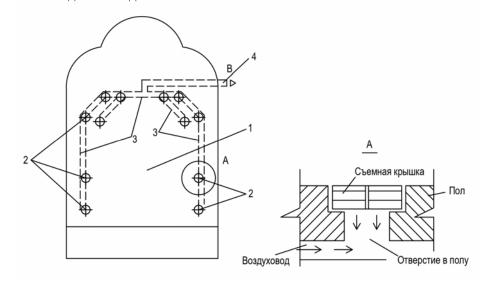


Рис. 1. Условная схема свободного расположения подсвечников в зале богослужения строящегося собора:

- 1 зал богослужения; 2 отверстия в полу, соединенные с вытяжным воздуховодом;
- 3 вытяжной воздуховод; 4 место удаления загрязненного воздуха за пределы собора

На рис.1 показана примерная схема расположения подсвечников и отверстий в полу, а именно схема прокладки вытяжного воздуховода за пределы помещения. Для этого авторами статьи разработана специальная конструкция подсвечника (рис. 2), который присоединяется к системе вытяжных воздуховодов, проложенных ниже пола под потолком подвального помещения или в каналах. При данном решении в необходимых местах установки подсвечников в полу зала богослужения делаются отверстия для соединения отводящей трубы, проходящей через стойку подсвечника, с воздуховодом. Ввиду того что подсвечники перемещают по залу по мере необходимости, важно предусмотреть дополнительные отверстия в полу зала, которые сверху закрываются художественно-оформленным люком (крышкой) из материала покрытия пола (см. рис.1, узел A).

Новым в конструкции подсвечника является канал (труба), который размещен внутри стойки подсвечника и соединяется с воздуховодом. Канал (труба) выходит выше столешницы и сверху укрывается зонтом в виде колпака для улавливания вредностей от сгорания свечей. Конвективный воздушный поток поднимается вверх, упирается внутри в стенки зонта и за счет естественного или искусственного давления отводится в канал (трубу) и дальше по вытяжному воздуховоду удаляется наружу. Процесс удаления воздуха может быть как естественным, так и механическим за счет вентилятора, установленного в сети воздуховодов.

В последнее время в стране ведется активная работа по восстановлению, реконструкции, реставрации соборов, храмов, церквей, построенных в прежние века. В реконструируемых или восстанавливаемых соборах затруднительно использовать способ

прокладки воздуховодов для удаления вредностей под полом или в каналах. В данном случае предлагается групповая установка зонтов в одну линию над подсвечниками для улавливания и удаления продуктов сгорания от свечей наружу. Подсвечники предлагается располагать вдоль наружных стен, окон на расстоянии 1,5 м и друг от друга также на 1,5 м, это обеспечивает свободный доступ прихожан к подсвечникам (рис. 3).

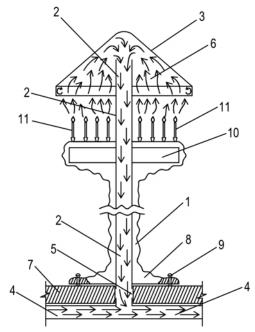


Рис. 2. Принципиальная конструкция подсвечника с каналом (трубой) внутри стойки: 1 – стойка подсвечника; 2 – канал (труба); 3 – зонт; 4 – вытяжной воздуховод; 5 – отверстия в полу; 6 – конвективный поток; 7 – пол в зале богослужения; 8 – основание подсвечника; 9 – регулировочные винты; 10 – столешница; 11 – свеча

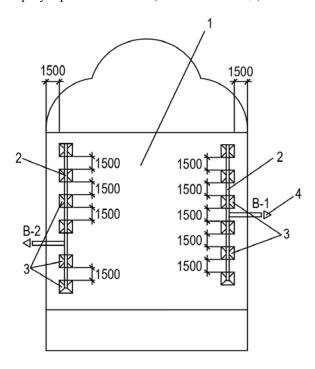


Рис. 3. Условная схема расположения подсвечников в зале богослужения вдоль стен в существующих соборах:

1 – зал богослужения; 2 – вытяжной воздуховод; 3 – зонт над подсвечником; 4 – место удаления загрязненного воздуха за пределы собора

Нижняя кромка зонта должна находиться на расстоянии 1,8-2,0 м от пола, что позволит обеспечить свободное перемещение прихожан. Условная аксонометрическая схема местной вытяжной вентиляции (естественной, механической) для удаления продуктов сгорания от свечей в зале богослужения собора приведена на рис. 4.

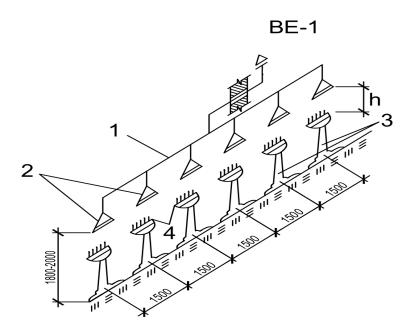


Рис. 4. Условная аксонометрическая схема местной вытяжной вентиляции для удаления продуктов сгорания от свечей в зале богослужения собора: 1 – воздуховод; 2 – зонт над подсвечником; 3 – подсвечник; 4 – свечи; h – расстояние от столешницы подсвечника до основания зонта (определяется расчетом)

Подсвечники устанавливают в один ряд вдоль наружной стены, их количество регулируется в зависимости от проводимого богослужения и рассчитывается на максимальное количество прихожан, а также полное заполнение столешницы свечами. Теплота $Q_{\text{свеч}}$, Вт, возникающая в результате горения свечей, способствует образованию восходящего конвективного потока. Горячий воздух вместе с продуктами сгорания (сажа, копоть, влага, теплота, углекислый газ) поднимается вверх и улавливается зонтом, далее по воздуховоду удаляется наружу. Размеры зонта определяются расчетным путем с учетом параметров конвективного потока.

При достаточно конвективном потоке движение воздуха по воздуховоду осуществляется естественным путем за счет разности плотностей горячего ρ_{vx} и холодного ρ_{H} воздуха, при слабом конвективном потоке - искусственным путем с помощью вентилятора. При естественном движении воздуха в системе воздуховодов для обеспечения циркуляционного давления необходимо, чтобы высота воздуховода снаружи составляла не менее 2 м от нижней кромки зонта до устья воздуховода.

Для выполнения гидравлического расчета системы естественной вытяжной вентиляции величина естественного давления $\Delta P_{\rm e}$, Па, определяется по формуле

$$\Delta P_{\rm e} = q \cdot (\rho_{\rm H} - \rho_{\rm VX}) \cdot H, \, \text{K}\Gamma/\text{M}^3, \tag{1}$$

где $\rho_{\rm H}$, $\rho_{\rm yx}$ – соответственно плотность наружного и удаляемого воздуха, кг/м³; q – ускорение свободного падения, M/c^2 ; H – расстояние от нижней кромки зонта до верха наружного воздуховода (определяется расчетом), м.

Для эффективной работы системы вытяжной вентиляции в зале богослужения к местному отсосу (зонту) предъявляется ряд технических и конструктивных требований: источник образования вредностей от горения свечей должен быть эффективно укрыт; зонт не должен мешать перемещению прихожан; направление движения воздуха в зонте местного отсоса должно совпадать с направлением естественного движения конвективного потока вместе с вредностями; местный отсос и воздуховоды должны иметь эстетически привлекательный внешний вид и быть негромоздкими; система должна иметь малое гидравлическое сопротивление.

В технических решениях для организации местной вытяжной вентиляции рекомендуются различные конструкции местных отсосов. Они бывают круглой, прямоугольной и другой формы. Возможные типы зонтов, показанные на рис.5, могут использоваться для улавливания и удаления вредностей от сгорания свечей в залах богослужения соборов.

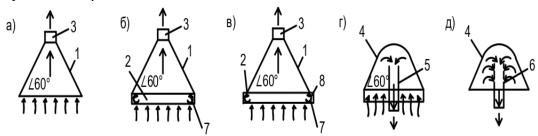


Рис. 5. Типы зонтов над столешницей светильников для удаления продуктов сгорания свечей: а – простой зонт; б – зонт с навесом; в – зонт с карманом; г – зонт с опрокинутым удалением воздуха; д – эффективный зонт с опрокинутым удалением воздуха;

1 – конусная часть; 2 – «юбка»; 3 – вытяжной воздуховод; 4 – конусная часть с закруглением вершины зонта; 5 – вытяжная труба; 6 – перфорированная вытяжная труба; 7 – воздушный вихрь; 8 – «карман»

Представленные на рис. 5 местные отсосы предлагается использовать для улавливания и удаления воздуха вместе с продуктами сгорания от свечей за пределы помещения. Форма основания зонта должна соответствовать форме столешницы подсвечника (круглая, прямоугольная).

Для эффективного улавливания зонтом гари, сажи, влаги, теплоты, углекислого газа необходимо обеспечить скорость воздуха в рабочем проеме зонта, равную скорости в рабочем пространстве. Это возможно при условии, если угол между конусной частью зонта не будет превышать 60°.

Известно, что вблизи кромки входного отверстия зонта происходит вихревое сужение конвективного потока воздуха, в результате вредности вырываются обратно в помещение. Устранить это явление можно путем устройства «юбки» и «кармана», внутри которых образуется воздушный вихрь. В результате входное отверстие зонта улавливает вредности полным сечением. Площадь выходного отверстия зонта $A_{30\text{H}}$, м², находят по формулам [14, 15] с уточнением физических наименований:

$$A_{30H} = 1.5 \cdot A_{MCT},$$
 (2)

$$A_{30H} = 1.5 \cdot L_{KOH},$$
 (3)

где $A_{\rm ист}$ – площадь столешницы подсвечника, м²; $L_{\rm кон}$ – объемный расход воздуха в конвективной струе, м³/ч.

Объемный расход воздуха в конвективной струе определяется по формуле [15] с уточнением физических наименований:

$$L_{\text{KOH}} = 4,04 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{Q_{\text{cBe}^{\text{H}}} \cdot A_{\text{HCT}}^2 \cdot H}$$
, (4)

где $Q_{\text{свеч}}$ – количество теплоты, выделяемой при сгорании свечей, Вт; H – расстояние от столешницы подсвечника до кромки зонта, м.

Расход воздуха, удаляемого зонтом, L_{30H} , м 3 /ч, можно определить по общепринятой формуле:

$$L_{30H} = 3600 \cdot A_{30H} \cdot v,$$
 (5)

где у – скорость воздуха во входном отверстии зонта, м/с.

При улавливании и удалении нетоксичных вредностей в результате сгорания свечей величина скорости v принимается равной 0,15–0,25 м/с. Средняя скорость в кон-

вективной струе должна соответствовать 0,5 м/с. Размер зонта следует рассчитывать с учетом максимального количества сгораемых свеч, а также того, что использование необходимого количества свечей имеет периодический характер. Для эффективного действия зонта важно соблюдать определенные конструктивные размеры и их соотношение, предложенные рядом авторов и приведенные в технической литературе [14, 15] (рис. 6).

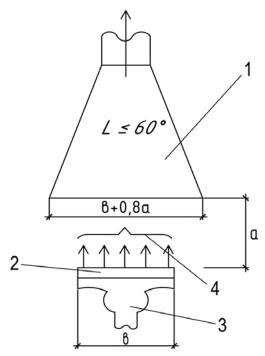


Рис. 6. Схема вытяжного зонта:

1 – вытяжной зонт; 2 – источник вредных выделений (горение свечей, размещенных на столешнице подсвечника); 3 – подсвечник; 4 – свечи

Соблюдение указанных на рис. 6 конструктивных размеров обеспечивает равномерное распределение воздуха во входном сечении зонта и полное улавливание вредностей в восходящем конвективном потоке.

Если известно количество вредных веществ, выделяющихся от сгорания свечей, то концентрацию вредностей внутри зонта $q_{\rm KB}$, г/м³, можно определить по известной формуле:

$$q_{\text{\tiny KB}} = l_{\text{\tiny yx}} \cdot q_{\text{\tiny yx}} \cdot \frac{l_{\text{\tiny yx}} \cdot G_{\text{\tiny yx}}}{L_{\text{\tiny vx}}}, \tag{6}$$

где $l_{\rm yx}$ — коэффициент, зависящий от формы и соотношения размеров зонта; $q_{\rm yx}$ — концентрация вредных веществ в уходящем из зонта воздухе, г/м³; $G_{\rm yx}$ — количество вредных веществ, выделяющихся при сгорании свечи, г/м³; $L_{\rm yx}$ — количество воздуха, удаленного зонтом, м³/ч.

С применением местной вытяжной вентиляции в зале богослужения православных храмов значительно снижается концентрация вредностей, поступающих от горения свечей, дыма, копоти, сажи, влаги и углекислого газа, а также исключается оседание сажи (копоти) на стенах, потолках, сводах, куполах, фресках, иконах, произведениях живописи, архитектурных элементах. Таким образом, предложенная местная вытяжная вентиляция позволит сократить трудозатраты, связанные с необходимостью проведения очистки и ремонта внутренних поверхностей, ограждений, икон, элементов декора, а также расширить площадь зала и обеспечить требуемый микроклимат для прихожан, кроме того, сохранить в надлежащем состоянии внутреннее убранство внутри зала богослужения собора.

Список литературы

- 1. ABOK. Стандарт 2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: отраслевой стандарт: дата введения НП «ABOK» 09.06.04. М.: ABOK-ПРЕСС, 2004. 14 с.
- 2. ABOK. Стандарт 2-2002. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: отраслевой стандарт: дата введения НП «ABOK» 09.06.04.-M.: ABOK-ПРЕСС, 2002.-14 с.
- 3. МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т.2. Православные храмы и комплексы / Архитектурно-художественный центр Московской Патриархии; составитель М.Ю. Кеслер. М.: Технорматив, 2008. 194с.
- 4. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов: монография / А.Г. Кочев; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. Н. Новгород: ННГАСУ, 2004. 449с.
- 5. Кочев, А.Г. Системы кондиционирования микроклимата в православных храмах / А.Г. Кочев. М.: ABOK–Пресс, 2009. –230 с.
- 6. СП 391.132.5800. 2017. Храмы православные. Правила проектирования / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. М., 2018.
- 7. Кочев, А.Г. Вентиляция промышленных зданий и сооружений / А.Г. Кочев. Н. Новгород: ННГАСУ, 2011. 178 с.
- 8. Чем дышат храмы? Благовест. URL: http://blagovest/ru/blog/chem-dyshatphramy, свободный (11.01.2020).
- 9. СП 31-103–99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов / Госстрой России. М.: АХЦ «Арххрам», ГУП ЦПП, 2000.
- 10. Щукина, Т.В. Влияние на микроклимат количества людей при разной заполняемости храмов / Т.В. Щукина, Н.А. Драпалюк, М.Н. Шерлыкина, М.А. Бойченко // COK. -2019. -№ 11. -C.66–-69.
- 11. Кочев, А.Г. Особенности создания микроклимата в православных храмах / А.Г. Кочев, М.М. Соколова, А.С. Сергиенко, А.С. Москалева, Е.А. Кочева // Известия ВУЗов. Строительство. -2016. -№ 4. -C.74-82.
- 12. Еремкин, А.И. Разработка комбинированной естественно-механической вытесняющей вентиляции в соборе святых Первоверховных апостолов Петра и Павла г. Пензы. Аллея науки / А.И. Еремкин, К.А. Петрова. URL: https://www.alleyscience.ru/domains_data/files/13January2019/RAZRABOTKA %20KOM BINIROVANNOY %20ESTESTVENNOMEHANIChESKOY %20VYTESNYaYuShEY %20VENTILYaCII %20V %20SOBORE %20SVYaTYH %20PERVOVERHOVNYH.pdf свободный (01.09.2020).
- 13. Еремкин, А.И. Совершенствование путей энергосбережений объектов капитального строительства при реализации национальных проектов / А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. − 2020. − №2. − С. 48–53.
- 14. Дроздов, В.Ф. Отопление и вентиляция. Ч.ІІ. Вентиляция / В.Ф. Дроздов. М.: Высшая школа, 1984. 262 с.
- 15. Тертичник, Е.И. Вентиляция / Е.И. Тертичник, П.Н. Каменев. М.: ACB, 2015.-607 с.
- 16. Еремкин, А.И. Анализ использования гибридных систем создания и поддержания искусственного микроклимата в православных соборах и храмах / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К. Петрова // Образование и наука в современном мире. Инновации. − 2020. − № 4. − С. 158–167.
- 17. Еремкин, А.И. Анализ и способы обеспечения микроклимата в православных соборах и храмах / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, А.Г. Багдасарян // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2020. № 4. С. 151–158.
- 18. Еремкин, А.И. Особенности применения вытесняющей вентиляции в системах кондиционирования воздуха в залах богослужения православных соборов и храмов / А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. − 2020. − № 2. − С. 151–158.

References

- 1. AVOK. Standard 2-2004. Orthodox churches. Heating, ventilation and air conditioning: industry standard: date of introduction of NP «AVOK» 09.06.04. M.: AVOK-PRESS, 2004. 14 p.
- 2. AVOK Standard 2-2002. Orthodox churches. Heating, ventilation and air conditioning: industry standard: date of introduction of NP «AVOK» 09.06.04. M.: AVOK-PRESS, 2002. 14 p.
- 3. MDS 31-9.2003. Orthodox churches. T.2. Orthodox churches and complexes / Architectural and Art Center of the Moscow Patriarchate; compiled by M.Yu. Kesler. M.: Tekhnormative, 2008. 194 p.
- 4. Kochev, A.G. Microclimate of Orthodox churches: monograph / A.G. Kochev; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. Nizhny Novgorod: NNGASU, 2004. 449 p.
- 5. Kochev, A.G. Microclimate conditioning systems in Orthodox churches / A.G. Kochev. M.: AVOK–Press, 2009. –230 p.
- 6. SP 391.132.5800. 2017. Orthodox churches. Design rules. / Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. M., 2018.
- 7. Kochev, A.G. Ventilation of industrial buildings and structures / A.G. Kochev. Nizhny Novgorod: NNGASU, 2011. 178 p.
- 8. How can temples breathe? Blagovest. URL: http://blagovest/ru/blog/chem-dyshatphramy, free (01/11/2020).
- 9. SP 31-103 99. Buildings, structures and complexes of Orthodox churches / Gosstroy of Russia. M.: AHTs «Arkhkhram», GUP TsPP, 2000.
- 10. Shchukina, T.V. Influence on the microclimate of the number of people with different occupancy rates / T.V. Shchukina, N.A. Drapalyuk, M.N. Sherlykina, M.A. Boychenko // SOK. 2019. No. 11. P. 66-69.
- 11. Kochev, A.G. Features of creating a microclimate in Orthodox churches / A.G. Kochev, M.M. Sokolova, A.S. Sergienko, A.S. Moskaleva, E.A. Kocheva // Izvestiya VUZov. Building. 2016. No. 4. P. 74–82.
- 12. Eremkin, A.I. Development of combined natural-mechanical displacement ventilation in the Cathedral of the Holy Apostles Peter and Paul in Penza. Alley of Science / A.I. Eremkin, K.A. Petrova. URL: https://www.alleyscience.ru/domains_data/files/13January2019/RAZRABOTKA %20KOMBINIROVANNOY %20ESTESTVENNOMEH ANIChESKOY %20VYTESNYaYuShEY %20VYTESNYAYuShEY %20VENTILYaCII % 2020).
- 13. Eremkin, A.I. Improvement of ways of energy saving of capital construction objects in the implementation of national projects / A.I. Eremkin // Regional architecture and engineering. -2020. No. 2. P. 48-53.
- 14. Drozdov, V.F. Heating and ventilation. P. II Ventilation / V.F. Drozdov. M.: Higher school, 1984. 262 p.
- 15. Tertichnik, E.I. Ventilation / E.I. Tertichnik, P.N. Kamenev. M.: ASV, 2015. 607 p.
- 16. Eremkin, A.I. Analysis of the use of hybrid systems for creating and maintaining an artificial microclimate in Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K. Petrova // Education and Science in the Modern World. Innovation. 2020. No. 4. P. 158–167.
- 17. Eremkin, A.I. Analysis and methods of providing a microclimate in Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, A.G. Bagdasaryan // Education and Science in the Modern World. Innovation. 2020. No. 4. P. 151–158.
- 18. Eremkin, A.I. Features of the use of displacement ventilation in air conditioning systems in the halls of worship of Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin // Regional architecture and engineering. 2020. No. 2. P. 151–158.

УДК 519.7:69

Московский политехнический университет Россия, 107023, г. Москва, ул. Б.Семёновская, д. 38

Будылина Евгения Александровна,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Инфокогнитивные технологии»

E-mail: bud-ea@yandex,ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гарькина Ирина Александровна,

доктор технических наук, профессор кафедры «Математика и математическое моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,

доктор технических наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой «Математика и математическое моделирование» E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University Russia, 107023, Moscow, 38, B.Semenovskaya St.

Budylina Eugenia Aleksandrovna,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the department «Infocognitive Technologies» E-mail: bud-ea@yandex,ru

Penza State University of Architecture

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Garkina Irina Aleksandrovna,

and Construction

Doctor of Sciences, Professor of the department «Mathematics and Mathematical Modeling» E-mail: fmatem@pguas.ru

Danilov Alexander Maksimovich,

Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, Head of the department «Mathematics and Mathematical Modeling»

E-mail: fmatem@pguas.ru

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Рассматриваются актуальные вопросы имитационного моделирования эргатических систем с возможностью их трансфера на математическое моделирование и синтез композиционных материалов с регулируемыми свойствами как сложных систем. Основное внимание уделяется оценке неопределенностей в оценке параметров модели, параметрической идентификации, формированию стиля управления. Указана положительная апробация предлагаемых для синтеза методик.

Ключевые слова: сложные системы, эргатические системы, имитационное моделирование, композиты, синтез, методы

SOME ASPECTS OF COMPLEX CONTROLLED SYSTEMS SIMULATION

E.A. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov

Topical issues of imitation modeling of ergatic systems with the possibility of transferring them to mathematical modeling and synthesis of composite materials with adjustable properties as complex systems are considered. The main attention is paid to the assessment of uncertainties in the assessment of model parameters, parametric identification, and the formation of a management style. The positive approbation of the methods proposed for the synthesis is indicated.

Keywords: complex systems, ergatic systems, simulation, composites, synthesis, methods

1. Оценка неопределенностей параметров модели

При описании линейными моделями объект хотя бы приближенно должен быть линейным. Значения параметров должны быть выбраны так, чтобы, подавая на вход модели тот же входной сигнал, что и на вход объекта, можно было получить на ее выходе сигнал, который наблюдается на выходе объекта. На выходной сигнал объекта накладывается шум (источники как в самом объекте, так и в измерительных приборах).

Помехи и конечность времени наблюдения делают параметры модели неопределенными. Поэтому актуальны оценка неопределенности произвольного параметра и получение аналитических зависимостей, связывающих неопределенность параметров с основными факторами при решении задачи синтеза модели [1–3]. Эти зависимости могут использоваться для определения периода наблюдения для получения заданной точности модели и входных сигналов, при которых достигается наименьшая неопределенность в значениях параметров.

В качестве меры неопределенности значения параметра нами принималось среднеквадратичное значение дисперсии параметра

$$\overline{da_{i}^{2}} = \frac{2\pi}{T} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega \cdot S_{xx}(\omega) \cdot S_{nn}(\omega) \cdot \left[\left(\frac{\partial W(j\omega)}{\partial a_{i}} \right)_{a_{i0}} \right]^{2}}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} d\omega \cdot S_{xx}(\omega) \cdot \left| \left(\frac{\partial W(j\omega)}{\partial a_{i}} \right) \right|^{2} \right]^{2}};$$

 $da_i = a_i - a_{i0}$; $a_i - i$ -й параметр в передаточной функции модели $W(j\omega)$; a_{i0} – значение параметров $W(j\omega)$, при которых модель и объект оказываются идентичными (фактически определенные значения параметров a_i). Время наблюдения T должно быть большим: неопределенность обратно пропорциональна квадратному корню из T.

При анализе и синтезе сложных систем нами использовались упрощения, состоящие в предположении линейности объекта в области малых изменений, входящих в описание величин. При активных экспериментальных методах создавались специальные воздействия на объект, которые вызывали изменения выходных координат. При пассивных методах специальные воздействия не использовались; ограничивались данными нормального функционирования. Что касается точности результатов, то, как правило, использовался метод итераций. Первоначально определялись динамические характеристики отдельных элементов, а по ним – характеристики системы в целом. Использовался и другой подход к анализу и синтезу системы, когда сразу экспериментально определялись динамические характеристики системы в целом; достигалась большая достоверность получаемых характеристик. Основной недостаток – недостаточность данных о динамических характеристиках отдельных элементов. Динамические связи между входными и выходными величинами определялись между каждым из т входов и п выходов в виде характеристической матрицы

$$\|W_{ij}\| = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1m} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2m} \\ & & \dots & & \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nm} \end{bmatrix}.$$

В рассмотренных системах состояния объекта на интервале $T = \{t, t_0 \le t \le t_1\}$ с хорошим приближением описывались системой обыкновенных дифференциальных уравнений (управляемый процесс определялся на интервале $t_0 \le t \le t_1$ программным

ENGINEERING SYSTEMS

управлением $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$; вектор-функция $\mathbf{u}(x,t)$ — закон управления). При заданных начальных условиях решение представлялось в виде

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{x}(t_0) + \mathbf{x}_N(t-t_0);$$

$$\mathbf{x}_N(t-t_0) = \int_{t_0}^t \mathbf{\Gamma}(t-\tau) \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau;$$

$$\mathbf{\Gamma}(t-\tau) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)}.$$

Решение системы характеризует опорные траектории, соответствующие заданным начальным условиям при выбранном векторе управления $\mathbf{u} = \mathbf{u}_c(t)$. Оценка точности воспроизведения характеристик объекта в модели производилась по норме

$$\|\hat{\mathbf{x}}\| = \max_{i} \max_{t} |x_{ic}(t) - x_{iT}(t)|,$$

 $x_{ic}(t)$ – характеристики, полученные в результате натурных испытаний объекта; $x_{iT}(t)$ – расчетные характеристики объекта при тех же начальных условиях в соответствии с (1).

Методика испытаний имитационной модели соответствовала методам испытания реального объекта. Удалось получить значительный экспериментальный материал по определению управляющих движений оператора на модели и реальном объекте; выявить процесс приспособления оператора к специфике управления моделью. Число тренировок оператора на имитационной модели не превышало семи (формирование ложных навыков управления).

2. Параметрическая идентификация

В эргатических системах функционирования объекта и оператора настолько тесно связаны, что раздельное определение их параметров практически невозможно. Параметрическая идентификация возможна лишь с использованием итеративных методов. Идентификация осуществлялась по линеаризованным уравнениям движения

$$\dot{\mathbf{x}} = \alpha \mathbf{x} + \beta \mathbf{u}$$
.

 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)^{\mathrm{T}}, \mathbf{u} = (u_1, u_2, ..., u_m)^{\mathrm{T}}$ – соответственно *n*-мерный вектор состояния и *т*-мерный вектор управления, α, β – матрицы коэффициентов.

В конечных разностях

$$\frac{\mathbf{x}^{k+1}-\mathbf{x}^k}{\Delta t}\approx \alpha \mathbf{x}^k+\beta \mathbf{u}^k.$$

Или

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}^k + \mathbf{B}\mathbf{u}^k,$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{E} + \boldsymbol{\alpha}\Delta t = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ & \dots & \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \alpha_{11}\Delta t & \dots & \alpha_{1n}\Delta t \\ & \dots & \\ \alpha_{n1}\Delta t & \dots & 1 + \alpha_{nn}\Delta t \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\beta}\Delta t = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1m} \\ & \dots & \\ b_{n1} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11}\Delta t & \dots & \beta_{1m}\Delta t \\ & \dots & \\ \beta_{n1}\Delta t & \dots & \beta_{nm}\Delta t \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x}^k = \mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}(k\Delta t), \ \mathbf{u}^k = \mathbf{u}(t_k) = \mathbf{u}(k\Delta t).$$

Введя

$$\mathbf{w}^{k} = (x_{1}^{k}, x_{2}^{k}, \dots, x_{n}^{k}, u_{1}^{k}, u_{2}^{k}, \dots, u_{m}^{k})^{\mathrm{T}};$$

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} a_{11} \dots a_{1n} & b_{11} & \dots & b_{1m} \\ & \dots & & \\ a_{n1} \dots a_{nn} & b_{n1} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix},$$

получим:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{\Phi} \mathbf{w}^k$$

Для параметрической идентификации уравнения

$$x_i^{k+1} = a_{i1}x_1^k + \ldots + a_{in}x_n^k + b_{i1}u_1^k + \ldots + b_{im}u_m^k, i = \overline{1,n}$$

использовались синхронные измерения x_i^{k+1} и $x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k, u_1^k, u_2^k, \dots, u_m^k$:

$$x_{i(1)}^{k+1} = x_i^1, \ x_{1(1)}^k = x_1^0, \dots, x_{n(1)}^k = x_n^0, \ u_{1(1)}^k = u_1^0, \dots, u_{m(1)}^k = u_m^0,$$

$$x_{i(r)}^{k+1} = x_i^r, \ x_{1(r)}^k = x_1^{r-1}, \dots, x_{n(r)}^k = x_n^{r-1}, \ u_{1(r)}^k = u_1^{r-1}, \dots, u_{m(r)}^k = u_m^{r-1}$$

Для каждого i-го выхода x_i^{k+1} измерения удовлетворяют соотношениям

$$\boldsymbol{x}_{i(\mu)}^{k+1} = \mathbf{u}_{(\mu)}^{\mathrm{T}} \mathbf{a}_{i}.$$

Справедливо:

$$\mathbf{u}_{(\mu)} = \begin{bmatrix} x_{1}^{\mu-1}, \dots, x_{n}^{\mu-1}, u_{1}^{\mu-1}, \dots, u_{m}^{\mu-1} \end{bmatrix}^{\mathsf{T}} = \mathbf{w}_{(\mu-1)};$$

$$\mathbf{a}_{i} = \begin{bmatrix} a_{i1}, \dots, a_{in}, b_{i1}, \dots, b_{im} \end{bmatrix}^{\mathsf{T}};$$

$$\mathbf{\chi}_{i} = \mathbf{U}\mathbf{a}_{i};$$

$$\mathbf{\chi}_{i} = \begin{bmatrix} x_{i}^{1}, x_{i}^{2}, \dots, x_{i}^{r} \end{bmatrix}^{\mathsf{T}},$$

$$\begin{bmatrix} x_{1}^{0} \dots x_{n}^{0} & u_{1}^{0} \dots & u_{m}^{0} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{1}^{\mu-1} \dots x_{n}^{\mu-1} & u_{1}^{\mu-1} \dots & u_{m}^{\mu-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{a}_{i} = (\mathbf{U}^{\mathsf{T}}\mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^{\mathsf{T}}\mathbf{\chi}_{i}.$$

3. Имитационные характеристики. Оценка стиля управления

Качество имитационной модели оценивается по стилю управления оператора реальным объектом и в условиях модели. Выбор параметров оценки обычно зависит от индивидуальных предпочтений эксперта, личного опыта управления объектом и его комфортности (определяется собственной частотой колебаний объекта и коэффициентом демпфирования). Управление при больших частотах затрудняется инерционностью оператора, а при малых частотах — недостаточной реакцией. Предпочтение отдается объектам с собственной частотой колебаний ω_c в пределах 0,7–0,9 Γ μ и безразмерным коэффициентом ξ затухания 0,5–0,7. По организмическому принципу оператор достраивает свои параметры в соответствии с параметрами объекта: стиль управления зависит от приспособления оператора к параметрам объекта. Очевидна необходимость учета спектрального состава управляющих воздействий оператора для оценки стиля управления, а в конечном итоге — имитационных характеристик модели.

В системах с задержкой вида

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t);$$

$$\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Du(t) = F\ddot{x}(t) + Q\dot{x}(t) + Rx(t) + Sx(t - \tau)$$

параметры модели определялись решением методом Гаусса систем линейных уравнений, соответствующих матричным уравнениям

$$(U^{\mathsf{T}}U)X_{j} = U^{\mathsf{T}}Y_{j},$$

$$U = \begin{bmatrix} k_{1} - \overline{k} & \omega_{c1} - \omega_{c} & \xi_{1} - \overline{\xi} \\ k_{2} - \overline{k} & \omega_{c2} - \omega_{c} & \xi_{2} - \overline{\xi} \\ & \cdots \\ k_{n} - \overline{k} & \omega_{cn} - \omega_{c} & \xi_{n} - \overline{\xi} \end{bmatrix},$$

$$X_{1} = \begin{bmatrix} \gamma_{1} \\ \gamma_{2} \\ \gamma_{3} \end{bmatrix}, \quad X_{2} = \begin{bmatrix} \beta_{1} \\ \beta_{2} \\ \beta_{3} \end{bmatrix}, \quad \cdots, X_{s} = \begin{bmatrix} d_{1} \\ d_{2} \\ d_{3} \end{bmatrix}.$$

Определялись зависимости частных критериев управления от технических параметров объекта (стиль управления):

$$\begin{split} A_u &= -81, 3 + 353k + 41\omega_c + 117\xi \,, \\ D &= 90, 8 + 127k - 39, 2\omega_c - 16, 7\xi \,, \\ p &= 2, 83 + 4, 52k - 1, 22\omega_c + 0, 38\xi \,, \\ \hat{\omega} &= -2, 4 + 63, 3k + 7, 1\hat{\omega}_c - 4, 9\xi \,, \\ t_u &= 10, 3 + 4, 39k - 3, 31\hat{\omega}_c - 4, 64\xi \,. \end{split}$$

Осуществлялась многокритериальная оптимизация по глобальному аддитивному критерию

$$K = \alpha_1 A_{\nu} + \alpha_2 t_{\nu} + \alpha_3 p + \alpha_4 D + \alpha_5 \hat{\omega}.$$

Приведенная методика прошла положительную апробацию при разработке имитационных моделей ряда мобильных систем с ее трансфером на синтез композитов с регулируемыми свойствами [4...7].

Список литературы

- 1. Гарькина, И.А. Имитационное моделирование эргатических систем / И.А. Гарькина, И.Н. Гарькин, А.М. Данилов // Фундаментальные исследования. 2017. № 11–1. С. 41–46.
- 2. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Современные проблемы науки и образования. 2014. №4. С. 154.
- 3. Danilov, A. Imitators Of Dynamic Systems With Landing / A. Danilov, I. Garkina // IOP Conference Series: Materials science and engineering. 2018. Vol. 449. –P. 012002.
- 4. Garkina, I. Property modeling and durability of composite materials / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol.471. P. 032004.
- 5. Garkina, I. Kinetic processes in polydisperse systems: experience of practical approximation / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 814. P. 33–39.
- 6. Garkina, I.A. Composite materials: identification, control, synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science And Engineering. 2019. Vol.471. P.032005.
- 7. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. -2018. -№1-2. -C.60-63.

References

- 1. Garkina, I.A. Simulation modeling of ergatic systems / I.A. Garkina, I.N. Garkin, A.M. Danilov // Fundamental research. − 2017. − №. 11–1. − P. 41–46.
- 2. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Modern problems of science and education. -2014. $-N_{\odot}$. 4. -P. 154.
- 3. Danilov, A. Imitators Of Dynamic Systems With Landing / A. Danilov, I. Garkina // IOP Conference Series: Materials science and engineering. 2018. Vol. 449. P. 012002.
- 4. Garkina, I. Property modeling and durability of composite materials / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol.471. P. 032004.
- 5. Garkina, I. Kinetic processes in polydisperse systems: experience of practical approximation / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 814. P. 33–39.
- 6. Garkina, I.A. Composite materials: identification, control, synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science And Engineering. 2019. Vol.471. P.032005.
- 7. Garkina, I.A. Evolution of ideas about composite materials from the standpoint of a paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. -2018. N0-2. P. 60-63.

УДК 620.91

Воронежский государственный технический университет

Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября д. 84, тел. (8473) 277-02-65

Мершиев Александр Александрович,

старший преподаватель кафедры «Жилишно-коммунальное хозяйство» E-mail: sasha 1990@mail.ru

Шепс Роман Александрович,

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Жилишно-коммунальное хозяйство» E-mail: romansheps@yandex.ru

Лобанов Дмитрий Валерьевич,

старший преподаватель кафедры «Жилишно-коммунальное хозяйство» E-mail: ldv-36@mail.ru

Шашин Алексей Викторович,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Жилишно-коммунальное хозяйство»

E-mail: ingvent@mail.ru

Voronezh State Technical University

Russia, 394006, Voronezh, 84, 20-letiya Oktyabrya St., tel. (8473) 277-02-65

Mershiev Alexander Alexandrovich,

Senior Lecturer of the department «Housing and Communal Services»
E-mail: sasha __1990@mail.ru

Sheps Roman Alexandrovich,

Candidate of Sciences, Senior Lecturer of the department «Housing and Communal Services»

E-mail: romansheps@yandex.ru

Lobanov Dmitry Valerievich,

Senior Lecturer of the department «Housing and Communal Services» E-mail: ldv-36@mail.ru

Shashin Alexey Viktorovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Housing and Communal Services»

E-mail: ingvent@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОТОКА ПРЯМОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, НАПРАВЛЕННОГО НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

А.А. Мершиев, Р.А. Шепс, Д.В. Лобанов, А.В. Шашин

Приводятся результаты экспериментальных исследований прямого солнечного излучения в Центрально-Черноземном регионе. Описываются проведенные экспериментальные исследования по измерению потока прямого солнечного излучения на горизонтальной поверхности через светопрозрачную конструкцию. Данные измерений получены с помощью устройства высшего класса точности в период с 1 июля по 1 августа. Результаты эксперимента показали интенсивное волнообразное изменение потока солнечного излучения в период времени, равный 8 часам.

Ключевые слова: солнечное отопление, энергосбережение, энергоактивные солнечные системы, альтернативные источники энергии

DETERMINATION OF THE AMOUNT OF DIRECT SOLAR RADIATION FLUX DIRECTED AT HORIZONTAL SURFACE

A.A. Merschiev, R.A. Sheps, D.V. Lobanov, A.V. Shashin

The results of experimental studies of direct solar radiation in the Central Chernozem region are presented. Experimental studies of measuring the flow of direct solar radiation on a horizontal surface through a translucent structure are described. The measurement data was obtained using a device of the highest class of accuracy in the period from July 1 to August 1. The results of the experiment showed an intense wave-like change in the solar radiation flux over the time period of 8 hours.

Keywords: solar heating, energy saving, energy-active solar systems, alternative energy sources

ВВЕЛЕНИЕ

Возобновляемые источники энергии привлекают все больше внимания на всех уровнях мирового сообщества, с течением времени они приобрели не только энергетическое, но и политическое значение. Это вызвано повышением требований к экологичности, безопасности и устойчивому энергоснабжению человечества в будущем [1, 2].

Точное прогнозирование или расчет потоков солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность в конкретной географической точке, на практике невозможно, так как метеорологическая информация не всегда доступна и достоверна [3, 4]. Поэтому для расчета характеристик солнечных установок необходимо использовать данные экспериментальных измерений параметров солнечного излучения в рассматриваемом месте, а в дальнейшем с помощью разработанных коэффициентов применять в инженерной практике. Наиболее точной информацией является величина прямого солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность.

Характеристики солнечного излучения зачастую представляются в разных видах, но для понимания и использования данных по солнечному излучению и их последующему применению в инженерных расчетах важна следующая информация: являются ли данные результатом мгновенного измерения или за определенный период времени; временной интервал измерений; измеряемое излучение (прямое, рассеянное или суммарное); ориентация приемной поверхности; период осреднения (месяц или день).

Большинство измерений потоков падающего солнечного излучения включают прямое и рассеянное и относятся к горизонтальной приемной поверхности. Такие измерения можно проводить термоэлектрическими пирометрами. Чувствительность датчиков таких приборов не зависит от длины волны в спектре солнечного излучения, и они защищены от внешних воздействий, кроме того, данные приборы нечувствительны к углу падения излучения. Большая часть таких приборов позволяет получать ряды мгновенных данных, которые не являются средними или интегральными величинами. Поэтому данные записываются в память прибора или на персональный компьютер, а далее интегрируются графически.

Для оценки потока падающего солнечного излучения можно использовать также результаты измерений продолжительности времени, в течение которого солнечный диск на небе является видимым, т.е. при ясном небе. Наиболее доступными данными о потоках падающего солнечного излучения являются среднемесячные дневные суммы суммарного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, и часовые суммы суммарного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность для каждого часа. Наземные измерения потоков солнечного излучения выполнены под эгидой Всемирной метеорологической организации, представлены в архивах Мирового радиационного центра данных. Но следует отметить, что точность полученных данных не соответствует современным требованиям, погрешность составляет от 5 до 20 %.

Измерение потоков солнечного излучения, приходящих на наклонные или горизонтальные поверхности, является важным при определении поступления энергии на солнечные коллекторы. Долгое время традиционной единицей измерения плотности потока падающего солнечного излучения была калория/см 2 . В настоящее время более привычной единицей измерения принято считать $M \text{Дж/м}^2$ или Вт/m^2 .

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета динамического поведения солнечных установок и оборудования, а также моделирования долгосрочной работы установок необходимы более детальные данные о солнечном излучении. В связи с этим авторами были проведены измерения потока прямого солнечного излучения на горизонтальной поверхности через светопрозрачную конструкцию. Измерения выполнялись с помощью устройства высшего класса точности Tenmars TM-208 в период времени с 1 июля по 1 августа 2019 года.



Рис. 1. Устройство измерения солнечного излучения Tenmars TM-208

Измерения проводились на горизонтальной поверхности экспериментальной модели помещения, размещенной на территории кампуса Воронежского государственного технического университета. Для удобства обработки результатов измерения высота, ширина и длина модели равнялись одному метру. Экспериментальное помещение выполнено из легких конструкций, обеспечивающих требуемую величину термического сопротивления для г. Воронежа и соответствующих требованиям энергосбережения и энергоэффективности. Одно из вертикальных ограждений выполнено из светопрозрачного стеклопакета. Общий вид экспериментальной модели представлен на рис. 2.

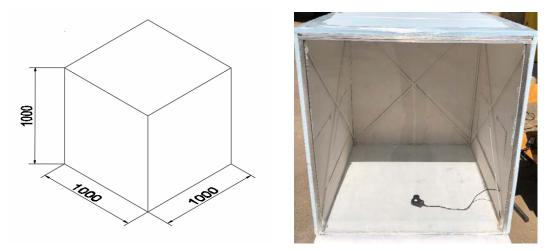


Рис. 2. Экспериментальная модель

Результаты измерений показали интенсивное волнообразное изменение потока солнечного излучения в период времени, равный 8 часам, и приведены графически на рис. 3.

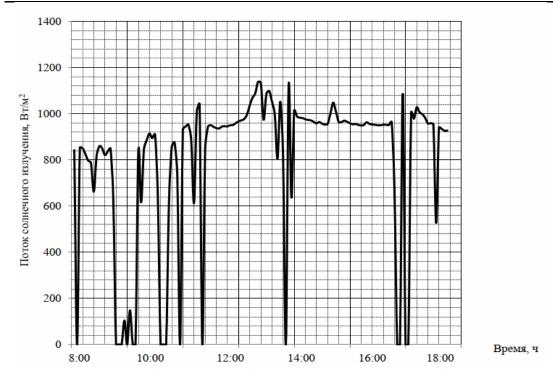


Рис. 3. Изменение потока солнечного излучения

Данные измерения являются наилучшим источником информации для оценки средних значений падающего солнечного излучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке результатов измерений величина среднемесячного потока солнечного излучения составила 980 Вт/м². Для проверки достоверности полученных результатов проведем сравнение полученной величины с ГОСТ Р 53615-2009 (МЭК 60721-2-4:1987) «Воздействие природных внешних условий на технические изделия. Общая характеристика. Солнечное излучение и температура»; пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91 «Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения»; СП 131.13330.2018 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология».

Значение величины среднемесячного потока солнечного излучения за июль 2019 года

Источник данных	Величина, Вт/м2	Отклонение, %
ГОСТ Р 53615-2009	1050	0
Эксперимент	980	6,67
ПОСОБИЕ 2.91 к СНиП 2.04.05-91	585	44,29
СП 131.13330.2018	724	31,04

Использование полученных значений позволит избежать ошибки при инженерном методе расчета производительности солнечных установок [5, 6].

В течение суток состояние атмосферы и ее масса изменяются, а рассеяние и поглощение падающего солнечного излучения будут зависеть от времени. При расчете потоков падающего на горизонтальную поверхность излучения за период времени или день в целом при стандартных условиях в атмосфере необходимо пользоваться понятием стандартного (чистого) неба. Профессором Массачусетского технологического института Хойтом Кларком Хоттелом [7] был предложен метод оценки потока прямого солнечного излучения, распространяющегося через прозрачную атмосферу, который учитывает зенитный угол и высоту места измерений. Однако метод позволяет производить расчеты для стандартных условий в атмосфере и четырех типов климата.

В данном случае коэффициент прозрачности атмосферы для прямого солнечного излучения τ_b считается равным отношению потока рассеянного излучения к потоку заатмосферного, падающего на горизонтальную поверхность, и определяется по формуле

$$\tau_b \equiv a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right),\tag{1}$$

где $\cos \theta_z$ – косинус зенитного угла солнца [8, 9],

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta; \tag{2}$$

 a_0, a_1, k — постоянные коэффициенты для стандартной атмосферы с видимостью 23 км, рассчитываются из значений коэффициентов a_0^*, a_1^*, k^* , которые определяются для высот в атмосфере менее 2,5 км следующими выражениями:

$$a_0^* \equiv 0,4273 - 0,0821(6 - A)^2,$$
 (3)

$$a_1^* \equiv 0,5055 + 0,0595(6,5 - A)^2,$$
 (4)

$$k^* \equiv 0,2711+0,01858(2,5-A)^2$$
. (5)

3десь A — высота наблюдения в километрах.

Прозрачность стандартной атмосферы для прямого излучения может быть определена для любого зенитного угла и любой высоты. В результате этого поток прямого излучения на нормальную к лучу поверхность при ясном небе определяется следующим образом:

$$G_{cnb} \equiv G_{on} \tau_b, \, \text{BT/M}^2, \tag{6}$$

где G_{on} – плотность потока солнечного излучения, $\mathrm{Br/m}^2$.

Но для того чтобы получить поток суммарного излучения, падающий на горизонтальную поверхность, необходимо оценить интенсивность и потока прямого солнечного излучения в условиях ясного неба. В [10] было предложено следующее эмпирическое соотношение между коэффициентом прозрачности для прямого и рассеянного излучения при ясном небе:

$$\tau_d = \frac{G_d}{G_0} = 0,271 - 0,294\tau_b, \tag{7}$$

где $\tau_d = G_d \ / \ G_0$ — отношение потока рассеянного излучения к потоку заатмосферного, падающего на горизонтальную поверхность. Вышеуказанное уравнение может быть использовано для оценки потока прямого солнечного излучения и его интенсивности.

Таким образом, поток излучения, падающий на горизонтальную поверхность, можно найти следующим образом:

$$G_{cd} \equiv G_{on} \cos \theta_z \tau_d , BT/M^2.$$
 (8)

На основании проведенных измерений оценим прозрачность атмосферы для прямого потока солнечного излучения для каждого часа (средины часа) и произведем расчет потока излучения, падающего на горизонтальную поверхность. Расчет τ_d выполним для интервала времени от 10 до 11 часов (т.е. для момента времени 10:30). Используя высоту стандартной атмосферы, равную 0,27 км, получим следующие значения коэффициентов:

$$a_0^* \equiv 0,4273 - 0,0821(6 - 0,27)^2 = 0,154;$$

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ
$$a_1^* \equiv 0,5055 + 0,0595(6,5-0,27)^2 = 0,736;$$

$$k^* \equiv 0,2711+0,01858(2,5-0,27)^2 = 0,363$$
.

Косинус зенитного угла солнца для заданного времени равен: $\cos \theta_z = 0,507$.

Тогда коэффициент пропускания атмосферы найдем по формуле (1):

$$\tau_b = 0.154 + 0.736 \exp\left(\frac{-0.363}{0.507}\right) = 0.513$$
.

Из уравнения (6) поток прямого излучения на нормальную к лучу поверхность при ясном небе, по результатам замеров, будет равен:

$$G_{cnb} \equiv 980 \cdot 0,513 = 502,74 \, \text{B} \, \text{T/m}^2$$

В этом случае, используя формулу (7), найдем отношение потока рассеянного излучения к потоку заатмосферного, падающего на горизонтальную поверхность:

$$\tau_d \equiv 0,271-0,294\cdot 0,513=0,12$$

Подставив полученное значение в уравнение (8), получим:

$$G_{cd} \equiv 980 \cdot 0,507 \cdot 0,12 = 59,62 \text{ BT/M}^2.$$

Полученное по экспериментальным данным значение отличается на 17 процентов от величины, найденной по табличным данным. Следовательно, целесообразно производить ежемесячные замеры с целью уточнения используемых физических величин. Уточнение методики позволит повысить эффективность и точность подбора солнечных установок в Центрально-Черноземном регионе.

выводы

- 1. Определена экспериментальным путем величина солнечного потока, падающего на горизонтальную поверхность. Проведено сравнение полученной величины с нормативными значениями, приведенными в технической и нормативно-справочной литературе.
- 2. Для повышения экономической привлекательности энергосберегающих мероприятий, основанных на использовании солнечной энергии, необходимо продолжить экспериментальные исследования в течение календарного года и получить величину годового отклонения от нормативных значений. На основе полученных данных провести технико-экономическое обоснование целесообразности применения энергосберегающих мероприятий с использованием солнечного излучения.

Список литературы

- 1. Sheps, R.A. Influence of solar energy on thermal protection of constructions / R.A. Sheps, S.A. Yaremenko, I.I. Pereslavtceva // Energy saving and energy efficiency at the industrial enterprises housing and communal services. Proc. of 1st Russian scientific and technical conference devoted to memory of the Dr.Sci.Tech., Professor A.A. Sander. -2017. – P. 199–209.
- 2. Sheps, R.A. The use of solar radiation in the application of energy-efficient walling / R.A. Sheps, N.V. Portnova, T.V. Shchukina, I.I. Pereslavtseva // Bulletin of Voronezh state technical University. - 2018. - Vol. 14, No. 3. - P. 46-51.
- 3. Sheps, R.A. Impact of dust walling the ability to absorb solar energy / R.A. Sheps, L.A. Kushchev, A.V. Shashin, D.V. Lobanov // Privolzhsky Scientific Journal. - 2017. -No. 4 (44). – P. 51–59.

- 4. Fathi, N.Y. View factors of flat solar collectors array in flat, inclined, and step-like solar fields / N.Y. Fathi, A. Samer // Trans. ASME. J. Sol. Energy Eng. -2016.-138.- No 6.-P. 061005/1-061005/8.
- 5. Vorotyntsev, A.V. Economic efficiency of the walling with the heat storage capacity / A.V. Vorotyntsev, V.A. Bolgov, R.A. Sheps, T.V. Shchukina // Economics and entrepreneurship. 2018. No. 7–9. P. 55–62.
- 6. Beccali, Marco. Solar heating and cooling systems versus conventional systems assisted by photovoltaic: Application of a simplified LCA tool / Beccali Marco, Cellura Maurizio, Longo Sonia, Guarino Francesco // Sol. Energy Mater. and Sol. Cells. 2016. 156. P. 92–100.
- 7. Hottel, H.C. Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres / H.C. Hottel // Solar Energy. 1976. Vol. 18. P. 129.
 - 8. Iqbal, M. An Introduction to Solar Radiation. Academic / M. Iqbal. Toronto, 1983.
- 9. Spencer, J.W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun / J.W. Spencer // Search. − 1971. − Vol. 2, №5. − P. 172.
- 10. Liu, B.Y.H. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation / B.Y.H. Liu, R.C. Jordan //Solar Energy. 1960. Vol. 4(3). P. 1.

References

- 1. Sheps, R.A. Influence of solar energy on thermal protection of constructions / R.A. Sheps, S.A. Yaremenko, I.I. Pereslavtceva // Energy saving and energy efficiency at the industrial enterprises housing and communal services. Proc. of 1st Russian scientific and technical conference devoted to memory of the Dr.Sci.Tech., Professor A.A. Sander. 2017. P. 199–209.
- 2. Sheps, R.A. The use of solar radiation in the application of energy-efficient walling / R.A. Sheps, N.V. Portnova, T.V. Shchukina, I.I. Pereslavtseva // Bulletin of Voronezh state technical University. 2018. Vol. 14, No. 3. P. 46–51.
- 3. Sheps, R.A. Impact of dust walling the ability to absorb solar energy / R.A. Sheps, L.A. Kushchev, A.V. Shashin, D.V. Lobanov // Privolzhsky Scientific Journal. 2017. No. 4 (44). P. 51–59.
- 4. Fathi, N.Y. View factors of flat solar collectors array in flat, inclined, and step-like solar fields / N.Y. Fathi, A. Samer // Trans. ASME. J. Sol. Energy Eng. -2016.-138.- No 6.-P.061005/1-061005/8.
- 5. Vorotyntsev, A.V. Economic efficiency of the walling with the heat storage capacity / A.V. Vorotyntsev, V.A. Bolgov, R.A. Sheps, T.V. Shchukina // Economics and entrepreneurship. -2018. -No. 7-9. -P. 55-62.
- 6. Beccali, Marco. Solar heating and cooling systems versus conventional systems assisted by photovoltaic: Application of a simplified LCA tool / Beccali Marco, Cellura Maurizio, Longo Sonia, Guarino Francesco // Sol. Energy Mater. and Sol. Cells. 2016. 156. P. 92–100.
- 7. Hottel, H.C. Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres / H.C. Hottel // Solar Energy. 1976. Vol. 18. P. 129.
 - 8. Iqbal, M. An Introduction to Solar Radiation. Academic / M. Iqbal. Toronto, 1983.
- 9. Spencer, J.W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun / J.W. Spencer // Search. − 1971. − Vol. 2, №5. − P. 172.
- 10. Liu, B.Y.H. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation / B.Y.H. Liu, R.C. Jordan //Solar Energy. 1960. Vol. 4(3). P. 1.

УДК 66.021.3; 628.356

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

, тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Андреев Сергей Юрьевич,

доктор технических наук, профессор кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» E-mail: andreev3007@rambler.ru Пензенский государственный университет Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные машины» E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Рубин» 440000, Россия, Пенза, Байдукова, 2, тел.: +7-8412-20-48-08

Князев Владимир Александрович,

кандидат технических наук, инженер 1-й категории Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Andreev Sergey Yuryevich,

Doctor of Sciences, Professor of the department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering» E-mail:andreev3007@rambler.ru Penza State University

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St., Tea.: (8412) 56-35-11;

факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of department «Transport Machines» E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

Joint Stock Company Research And Production Enterprise «Rubin»

440000, Russia, Penza, 2, Baidukova St., tel: + 7-8412-20-48-08

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,

Candidate of Sciences, 1st Category Engineer

НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕДАЧИ КИСЛОРОДА ВОЗДУХА В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ АЭРАЦИИ

С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.А. Князев

Приведены результаты анализа известных теорий массопередачи кислорода воздуха в воду в процессе работы пневматических систем аэрации. Предложена новая методика расчета процесса массопередачи кислорода через поверхность пузырька воздуха, учитывающая особенности режимов всплывания пузырьков. Получены уравнения, позволяющие определять величины объемного коэффициента массопередачи кислорода воздуха K_w (c¹) и коэффициента использования кислорода воздуха K_u , характеризующие эффективность работы пневматической системы аэрации. Предложенная методика позволяет учитывать эффект изменения формы пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентных режимах, и на этой основе более точно вычислять показатели процесса массопередачи.

Ключевые слова: система аэрации; пузырек воздуха; массопередача кислорода; режимы всплывания; коэффициент диффузии; окислительная способность

NEW METHOD FOR CALCULATING THE PROCESSES OF MASS TRANSFER OF AIR OXYGEN IN PNEUMATIC AERATION SYSTEMS

S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.A. Knyazev

The results of the analysis of known theories of mass transfer of air oxygen to water during the operation of pneumatic aeration systems are presented. A new method is proposed for calculating the process of mass transfer of oxygen through the surface of an air bubble, taking into account the features of bubble pop-up modes. Equations are obtained that allow us to determine the values of: the

ENGINEERING SYSTEMS volume coefficient of mass transfer of air oxygen $K_{\scriptscriptstyle W}$ (c⁻¹) and the coefficient of use of air oxygen K_u , which characterize the efficiency of the pneumatic aeration system. The proposed method allows us to take into account the effect of changing the shape of air bubbles that pop up in turbulent conditions and, on this basis, more accurately calculate the parameters of the mass transfer process.

Keywords: aeration system; air bubble; oxygen mass transfer; floating modes; diffusion coefficient; oxidative capacity

В настоящее время широкое распространение получили технологические схемы биологической очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод [1, 2]. Процессы аэробной биологической очистки сточных вод основываются на окислении содержащихся в них органических загрязнений микроорганизмами активного ила в присутствии кислорода воздуха. Биологическая аэробная очистка органических загрязнений сточных вод предполагает использование сложного комплекса инженерно-технических сооружений и требует для своей реализации существенных капитальных и эксплуатационных затрат. Значительная часть эксплуатационных затрат приходится на системы аэрации сточных вод. Оптимизация технологических и конструкционных параметров аэрационных систем позволяет существенно сократить эксплуатационные затраты, необходимые для нормального функционирования системы биологической очистки сточных вод.

Оптимизировать технологические и конструкционные параметры аэрационной системы можно, используя современные методы математического моделирования.

Существующие методы математического моделирования условно подразделяются на три группы:

- 1. Методы, позволяющие создавать экспериментальные математические модели (эмпирические методы), в которых количественные оценки взаимосвязей между основными элементами рассматриваемой системы производятся путем аппроксимирования полученных эмпирических данных. Математические модели, полученные этими методами, дают точные результаты только в узких границах значений параметров, соответствующих условиям проведения исходных экспериментов.
- 2. Методы, позволяющие создавать полуэмпирические модели на основе выведения критериальных комплексов с использованием методов теории подобия (Пи-теорема). Такие модели обладают гораздо большей универсальностью, чем математические модели, созданные с использованием первого метода.
- 3. Методы, позволяющие создавать теоретические (детерметированные) модели, базирующиеся на основе фундаментальных закономерностей, – существенных устойчивых и неслучайных связей между основными элементами рассматриваемой системы. Эти модели обладают наиболее точными прогнозирующими свойствами, позволяющими анализировать особенности рассматриваемой системы в широком диапазоне изменений ее параметров.

В основе работы всех систем аэрации лежит процесс молекулярной диффузии кислорода из воздуха пузырька в окружающую его жидкость.

Первая попытка теоретического описания процесса молекулярной диффузии была сделана немецким физиком Адольфом Ойгеном Фиком, который выдвинул предположение об аналогии процессов теплопередачи и массопередачи. На основании уравнения теплопередачи Фурье он в 1855 г. вывел уравнение, определяющее скорость диффузионного переноса вещества, которое применимо и для описания процесса массопередачи кислорода в воду из воздуха всплывающего пузырька:

$$q_{\rm T} = \frac{dm}{dt} = -DA\frac{dC}{dy}, \, \text{KT/c}, \tag{1}$$

где $q_{\rm T} = \frac{dm}{dt}$ – скорость процесса массопередачи кислорода из газовой фазы в жидкость, $\kappa \Gamma/c$; D – коэффициент молекулярной диффузии кислорода через поверхность

пузырька воздуха, M^2/c ; A — площадь поверхности межфазового контакта (суммарная площадь находящихся в воде пузырьков воздуха), M^2 ; $\frac{dC}{dv}$ – градиент концентрации

растворенного кислорода в нормальном направлении по отношению к поверхности раздела фаз, $\kappa \Gamma / M^4$.

В 1897 году американские ученые Артур Нойес и Уиллис Уитни опубликовали статью, в которой они описывали эксперимент по растворению твердого вещества в жидкости. Они показали, что на поверхности твердого вещества образуется тонкая жидкостная пленка, концентрация диффундирующего вещества в которой равна концентрации насыщенного раствора $C_{\rm H}$, кг/м³, а концентрация этого вещества в объеме жидкости вследствие ее перемешивания имеет некоторое постоянное значение С, кг/м3. В этом случае движущей силой, вызывающей процесс массопередачи является разность концентраций насыщенного раствора в поверхностном слое C_{H_2} $\kappa \Gamma/\text{м}^3$, и вещества в жидкости C, $\kappa \Gamma/\text{м}^3$:

$$\Delta C = C_{\rm H} - C, \, \text{kg/m}^3. \tag{2}$$

Поскольку на внешней поверхности пузырька воздуха образуется тонкий слой жидкости, имеющей концентрацию кислорода $C_{\rm H}$, формула (2) также может быть использована при описании процесса массопередачи в системах аэрации.

Количественное описание процесса диффузионного переноса кислорода из всплывающего в воде пузырька воздуха было проведено в рамках двухпленочной модели массопередачи Льюиса и Уитмена, разработанной в 1923–1924 гг. Математически двухпленочная модель массопередачи может быть представлена в виде формулы

$$q_{\rm T} = \frac{dm}{dt} = \frac{D_{\rm C,H}}{y} A(C_{\rm H} - C), \, \text{kg/c}, \tag{3}$$

где $D_{\rm CЛ}$ – коэффициент молекулярной псевдостационарной диффузии, м²/c; y – толщина пленки на поверхности пузырька воздуха, м.

Величину отношения коэффициента молекулярной диффузии D_{CII} к толщине границы раздела фаз «воздух – вода» у также принято называть «пленочным коэффициентом массопередачи»:

$$K_L = \frac{D_{\rm CH}}{y}, \, \text{m/c}. \tag{4}$$

В 1935 г. Хигби предложил теорию пенитрации (проникания), также основанную на двухпленочной модели, но без допущения о квазистационарном характере процесса массопередачи.

Для определения величины пленочного коэффициента массопередачи K_L Хигби было проведено асимптотическое решение второго уравнения Фурье, в результате которого было получено уравнение

$$K_L = 2\sqrt{\frac{D_{\rm HJ}\upsilon_\Pi}{\pi d_\Pi}}, \, \text{M/c},$$
 (5)

где $D_{\rm HJ}$ – коэффициент нестационарной молекулярной диффузии, величина которого отличается от величины псевдостационарной молекулярной диффузии $D_{\rm CII}$, м²/с; ${\it U}_{\rm II}$ — скорость всплывания пузырька воздуха, м/с; $d_{\rm II}$ — диаметр пузырька воздуха, м.

В 1951 г. Данквертс предложил теорию обновления поверхности пузырька воздуха, всплывающего в воде в турбулентном режиме.

В этой теории было принято допущение о том, что поверхность всплывающего пузырька непрерывно обновляется свежей жидкостью под действием возникающих на ней элементарных турбулентных вихрей.

Данквертсом была получена формула для определения величины пленочного коэффициента массопередачи

$$K_L = \sqrt{D_{\rm TJI}S}$$
, m/c, (6)

где $D_{\rm TД}$ — коэффициент турбулентной диффузии, величина которого отличается от значений коэффициентов $D_{\rm CД}$ и $D_{\rm HД}$, м²/с; S — фактор обновления поверхности пузырька воздуха, величина которого определяется как доля поверхности, обновляемой в единицу времени, ${\rm c}^{-1}$.

В своей теории Данквертс не рассматривал конкретных методов, позволяющих определить величину фактора S, что затрудняет использование его теории для расчета аэрационных систем.

В общем виде уравнение, описывающее процесс массопередачи кислорода воздуха в системах аэрации, можно представить как

$$q_{\rm T} = \frac{dm}{dt} = K_L A \left(C_{\rm H} - C \right), \, \kappa \Gamma / c, \tag{7}$$

где K_L – пленочный коэффициент массопередачи, величина которого может быть определена по формулам (4), (5) или (6), м/с; $C_{\rm H}$ – концентрация насыщения воды кислородом воздуха, кг/м³; $C_{\rm H}$ – концентрация кислорода в аэрационном бассейне, кг/м³.

В практике расчета аэрационных систем широкое распространение получило понятие удельной окислительной способности — количества растворяемого кислорода в единице аэрационного объема за единицу времени OC_y , кг/м³·с. Величина удельной окислительной способности определяется как отношение скорости процесса массопередачи кислорода $q_{\rm T}$, кг/с, к величине аэрационного объема W_a , м³:

$$OC_{y} = \frac{dC}{dt} = K_{L} \frac{A}{W_{a}} (C_{H} - C), \, \kappa \Gamma / M^{3} \cdot c.$$
(8)

Наряду с пленочным коэффициентом массопередачи K_L , м/с, для расчета аэрационных систем используется и объемный коэффициент массопередачи K_W , с⁻¹:

$$K_W = K_L \frac{A}{W_a}, c^{-1}. (9)$$

С учетом (9) уравнение (8) примет вид

$$OC_{v} = K_{W} \left(C_{H} - C \right), \text{ KF/M}^{3} \cdot c. \tag{10}$$

Значение удельной окислительной способности аэрационной системы также может быть определено по формуле

$$OC_{y} = q_{y}C_{KB}K_{u}, \kappa \Gamma/M^{3} \cdot c, \qquad (11)$$

где q_y — удельный секундный расход воздуха, м³/м³·с, — отношение объема подаваемого в систему аэрации за единицу времени воздуха $q_{\rm B}$, м³/с, к объему аэрационного бассейна W_a , м³; $C_{\rm KB}$ — масса кислорода, содержащегося в единице объема воздуха. При нормальных условиях $C_{\rm KB}$ =0,278 кг/м³; $K_{\rm H}$ — коэффициент использования кисло-

рода воздуха — отношение массы кислорода, растворяемого в аэрационном объеме к массе кислорода, содержащегося в прошедшем через аэратор воздухе.

Величина объемного коэффициента массопередачи может быть определена из уравнений (10) и (11):

$$K_W = q_y K_{\text{H}} \frac{C_{\text{KB}}}{C_{\text{H}} - C}, \, \text{c}^{-1}.$$
 (12)

Поскольку удельный секундный расход воздуха может быть определен как

$$q_{y} = \frac{I}{H}, \,\mathbf{M}^{3}/\mathbf{M}^{3} \cdot \mathbf{c},\tag{13}$$

где I — интенсивность аэрации — объем воздуха, подаваемого на единицу площади аэрационного бассейна за единицу времени, ${\rm M}^3/{\rm M}^2\cdot{\rm C}$; H — глубина аэрационного бассейна, м, то формула (12) может быть записана в виде

$$K_W = \frac{I}{H} K_{\text{\tiny H}} \frac{C_{\text{\tiny KB}}}{C_{\text{\tiny H}} - C}, c^{-1}.$$
 (14)

Величина объемного коэффициента массопередачи определяется экспериментально методом переменного дефицита кислорода по формуле

$$K_W = \frac{1}{t_a} \ln \frac{C_H - C_1}{C_H - C_2}, \, e^{-1}, \tag{15}$$

где t_a — продолжительность процесса аэрации, с; C_1 и C_2 — соответственно концентрация кислорода в аэрационном бассейне в начальный и конечный моменты аэрации, $\kappa \Gamma / M^3$.

Теоретическое значение объемного коэффициента массопередачи может быть определено по формуле (9). Величина площади поверхности контакта фаз в аэрационном бассейне A, \mathbf{m}^2 , при допущении, что все пузырьки воздуха имеют одинаковый диаметр d_{Π} , \mathbf{m} , может быть определена по формуле

$$A = N_{\Pi} S_{\Pi} = \frac{W_{\rm B}}{W_{\Pi}} S_{\Pi} = q_{y} W_{a} t_{\Pi} \frac{S_{\Pi}}{W_{\Pi}} = \frac{I}{H} \frac{W_{a}}{\delta_{\Pi}} t_{\Pi} = \frac{I}{H} \frac{K_{\Pi}}{d_{\Pi}} W_{a} t_{\Pi}, M^{2},$$
(16)

где N_Π — число пузырьков воздуха в аэрационном бассейне, шт.; S_Π — площадь внешней поверхности пузырька воздуха, м²; $W_{\rm B}$ — объем, занимаемый газовой фазой в аэрационном бассейне, м³; W_Π — объем, пузырька воздуха, м³; t_Π — продолжительность всплывания пузырька воздуха в слое жидкости, с; $\delta_\Pi = \frac{W_\Pi}{S_\Pi} = \frac{d_\Pi}{K_\Pi}$ — дис-

персный размер пузырька воздуха, м; $K_{\rm Д}$ – коэффициент дисперсности пузырька воздуха.

Продолжительность всплывания пузырька воздуха в слое жидкости t_{Π} , с, может быть определена как отношение глубины погружения аэратора h, м, к скорости всплывания пузырька воздуха υ_{Π} , м/с. Экспериментальные исследования [1, 2] показали, что в процессе работы пневматической системы аэрации в аэрационном бассейне возникает эрлифтный эффект, приводящей к тому, что пузырьки воздуха всплывают в слое жидкости, движущейся вместе с ними, в результате чего длительность контакта газовой и жидкой фаз уменьшается и величина t_{Π} определяется формулой

$$t_{\Pi} = \frac{h^{0.67}}{v_{\Pi}}, c.$$
 (17)

С учетом формул (9), (16) и (17) теоретическое значение объемного коэффициента массопередачи может быть определено как

$$K_{W} = \frac{I}{H} \frac{K_{\Pi}}{d_{\Pi}} W_{a} \frac{h^{0,67}}{\upsilon_{\Pi}} \frac{1}{W_{M}} K_{L} = \frac{K_{\Pi}}{d_{\Pi}} \frac{h^{0,67}}{H} \frac{I}{\upsilon_{\Pi}} K_{L}, c^{-1},$$
(18)

при H=h

$$K_W = \frac{K_{\pi}}{d_{\pi}} \frac{I}{v_{\pi}} \frac{1}{h^{0.33}} K_L, c^{-1}.$$
 (19)

Величина теоретического значения коэффициента использования кислорода воздуха может быть определена из формулы (14) с учетом (18):

$$K_{\text{H}} = K_{W} \frac{H}{I} \frac{C_{\text{H}} - C}{C_{\text{KB}}} = \frac{K_{\text{A}}}{d_{\text{II}}} \frac{I}{\upsilon_{\text{II}}} \frac{h^{0.67}}{H} K_{L} \frac{H}{I} \frac{C_{\text{H}} - C}{C_{\text{KB}}} = \frac{K_{\text{A}}}{d_{\text{II}}} \upsilon_{\text{II}} h^{0.67} K_{L} \frac{C_{\text{H}} - C}{C_{\text{KB}}}.$$
(20)

Поскольку имеются затруднения в определении значения фактора обновления поверхности S в формуле (6) и величины толщины пленки на поверхности пузырька воздуха y, м, в формуле (4) для теоретического описания процесса молекулярной диффузии кислорода воздуха в настоящее время принято использовать величину пленочного коэффициента Хигби K_L , определяемую по формуле (5), и опираться на допущение о том, что процесс массопередачи происходит не из реальной, а из гипотетической водовоздушной смеси, содержащей пузырьки воздуха, имеющие строго сферическую форму и одинаковый диаметр d_{Π} , м.

Исходя их этих допущений Раммом в 1976 г. были проведены экспериментальные исследования мелкопузырчатой системы аэрации, позволившие ему определить величину коэффициента нестационарной молекулярной диффузии для кислорода воздуха в пузырьке, всплывающем в воде при температуре T=20°C с $D_{\rm HJ}=1.8\cdot10^{-9}$ м²/с [2].

На рис. 1 представлен график зависимости скорости свободного всплывания пузырька воздуха в чистой воде υ_Π , м/с, от его диаметра d_Π , м [3].

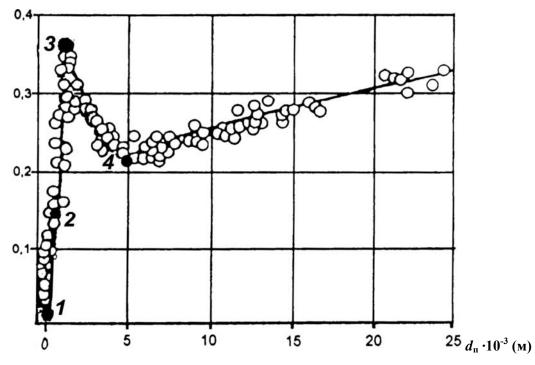


Рис. 1. Зависимость скорости свободного всплывания пузырька воздуха в чистой воде υ_Π от его диаметра d_Π согласно [3]

В турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха (график между точками 3 и 4, см. рис. 1) при увеличении его диаметра от d_{Π} =1,37·10⁻³м до d_{Π} =5,0·10⁻³ происходит деформация пузырька, в результате чего он изменяет свою форму и приобретает вид сплющенного сфероида с большей осью, нормальной к направлению движения пузырька. Происходит переход от вязкого сопротивления к сопротивлению изменившейся формы, в результате чего скорость всплывания пузырька υ_{Π} уменьшается при увеличении значения d_{Π} .

В турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха в области автомодельности закона сопротивления при увеличении его диаметра более d_{Π} =5,0·10⁻³м коэффициент гидравлического сопротивления пузырька воздуха становится постоянной величиной $\xi = \text{const}$, и скорость всплывания υ_{Π} увеличивается при увеличении значения d_{Π} .

В работе [4] приведены формулы для определения величины скорости всплывания пузырька υ_Π и коэффициента его дисперсности K_Π .

В турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха $(1,37\cdot 10^{-3}\,\mathrm{M} < d_\Pi \le 5,0\cdot 10^{-3}\,\mathrm{M})$

$$v_{\Pi} = 0,0206 \cdot d_{\Pi}^{-0,438}, \text{ m/c};$$
 (21)

$$K_{\Pi} = 753, 3 \cdot d_{\Pi}^{0,733} \,. \tag{22}$$

В турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха в области автомодельности закона сопротивления ($d_{\Pi} > 5,0 \cdot 10^{-3} \text{м}$)

$$v_{\Pi} = 0.8 \cdot d_{\Pi}^{0.25}, \text{ m/c};$$
 (23)

$$K_{\Pi} = 219, 2 \cdot d_{\Pi}^{0,5}, \text{ m/c.}$$
 (24)

Величина теоретического значения коэффициента использования кислорода воздуха $K_{\rm u}$ при турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха может быть получена путем подстановки в формулу (20) формул (5), (21) при значении $K_{\rm II}$ =6=const и h=1 м.

$$K_{\text{\tiny HTI}} = \frac{6}{d_{\Pi} \upsilon_{\Pi}} 1^{0,67} K_{L} \frac{\left(C_{\text{H}} - C\right)}{C_{\text{KB}}} = \frac{6}{d_{\Pi} \upsilon_{\Pi}} 2 \sqrt{\frac{D_{\text{HД}} \upsilon_{\Pi}}{\pi d_{\Pi}}} \frac{C_{\text{H}} - C}{C_{\text{KB}}} =$$

$$= \frac{6}{d_{\Pi}} \frac{d_{\Pi}^{0,438}}{0,0206} 2 \sqrt{\frac{0,0206}{d_{\Pi}^{0,438}} \frac{D_{\text{HД}}}{3,14d_{\Pi}}} = \frac{47,171}{d_{\Pi}^{1,281}} \sqrt{D_{\text{HД}}} \frac{C_{\text{H}} - C}{C_{\text{KB}}}.$$
(25)

Принимаем значения $D_{\rm HJ}=1,8\cdot 10^{-9}\,{\rm m}^2;~C_{\rm KB}=0,278~$ кг/м $^3;~C=0,002$ кг/м . Величина $C_{\rm H}$ при глубине слоя воды h=1~ м и растворимости кислорода воздуха в воде при $T=20^{\circ}C$ и $C_{\rm HO}=0,00902$ кг/м 3 может быть определена по формуле

$$C_{\rm H} = C_{\rm HO} \left(1 + \frac{h}{20.6} \right) = 0,00902 \left(1 + \frac{1}{20.6} \right) = 0,00946 \text{ kg/m}^3.$$
 (26)

В этом случае

$$K_{\text{\tiny HTI}} = \frac{47,171}{d_{\Pi}^{1,281}} \sqrt{1,8 \cdot 10^{-9}} \frac{0,00946 - 0,002}{0,278} = \frac{0,0000537}{d_{\Pi}^{1,281}}.$$
 (27)

Величина теоретического значения коэффициента использования кислорода воздуха $K_{\rm u}$ при турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха в области автомо-

дельности закона сопротивления может быть получена путем подстановки в формулу (20) формул (5) и (23) при значении $K_{\rm II}=6\,$ и $\,h=1\,$ м .

$$K_{\text{HAI}} = \frac{6}{d_{\Pi}} \frac{2}{0.8 d_{\Pi}^{0.25}} \sqrt{\frac{0.8 d_{\Pi}^{0.25} D_{\text{HAI}}}{3.14 d_{\Pi}}} \frac{C_{\text{H}} - C}{C_{\text{KB}}} =$$

$$= \frac{7.569}{d_{\Pi}^{1.625}} \sqrt{1.8 \cdot 10^{-9}} \frac{0.00946 - 0.002}{0.278} = \frac{0.0000086}{d_{\Pi}^{1.625}}.$$
(28)

В работе [1] приводится полуэмпирическая математическая модель, описывающая процесс массопередачи кислорода воздуха в аэрационных системах, созданная на основе выведения критериальных комплексов с использованием методов теории подобия.

Группируя физические параметры, определяющие эффективность системы аэрации, и принимая объемный коэффициент массопередачи K_W в первой степени, было составлено критериальное уравнение, которое описывает величину модифицированного критерия Стантона $St = \frac{K_W d_\Pi}{I}$ тремя безразмерными комплексами:

$$St = \frac{K_W d_{\Pi}}{I} = K \left(\frac{h}{d_{\Pi}}\right)^{n_1} \left(\frac{h}{H}\right)^{n_2} \left(\frac{b}{B}\right)^{n_3},\tag{29}$$

где K — коэффициент, имеющий постоянное значение; b — ширина полосы аэрации в аэрационном бассейне, м; B — ширина аэрационного бассейна, м; n_1 , n_2 , n_3 — показатели степени.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить следующие значения показателей степени $n_1 = -0.33$; $n_2 = 1$; $n_3 = 0.18$.

Подставляя в уравнение (29) полученные значения показателей степени n, преобразуем его к виду

$$K_W = \frac{K}{d_{\rm H}^{0.67}} \frac{h^{0.67}}{H} \left(\frac{b}{B}\right)^{0.18} I, c^{-1}.$$
 (30)

Принимая значения h=H и b=B, уравнение (30) можно записать в следующем виде:

$$K_W = \frac{K}{d_{\Pi}^{0,67}} \frac{I}{h^{0,33}}, c^{-1}.$$
 (31)

Из формулы (14) с учетом формулы (31) может быть получено уравнение

$$K_{H} = K_{W} \frac{H}{I} \frac{C_{H} - C}{C_{KB}} = \frac{K}{d_{\Pi}^{0,67}} \frac{I}{h^{0,33}} \frac{H}{I} \frac{C_{H} - C}{C_{KB}} = \frac{K}{d_{\Pi}^{0,67}} \frac{H}{h^{0,33}} \frac{C_{H} - C}{C_{KB}}.$$
 (32)

В работе [2] приводится следующее значение среднего диаметра пузырьков воздуха, образующихся в процессе функционирования мелкопузырчатой системы аэрации, $-d_{\Pi} = 4 \cdot 10^{-3}$ м, а в работе [1] утверждается, что комплекс $\frac{K}{d_{\Pi}^{0.67}}$ в формуле (30) при эксплуатации мелкопузырчатой системы аэрации достигает величины 2,3.

При величине комплекса $\frac{K}{d_{\Pi}^{0,67}} = 2,3$ и диаметре пузырька воздуха $d_{\Pi} = 4 \cdot 10^{-3}$ м коэффициент K будет иметь значение 0,057. При величине K = 0,057; H = h = 1 м;

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ $C_{\rm H}=0,00946~{\rm kr/m^3};~~C=0,002~{\rm kr/m^3};~~C_{\rm KB}=0,278~{\rm kr/m^3}~~ формула~(32)~~будет~~иметь$

$$K_{_{\mathrm{II}}} = \frac{0,057}{d_{_{\mathrm{II}}}^{0,67}} \frac{1}{1^{0,32}} \frac{0,00946 - 0,002}{0,278} = \frac{0,0015}{d_{_{\mathrm{II}}}^{0,67}}.$$
 (33)

Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что кинетика процесса массопередачи кислорода воздуха в воду из всплывающих в турбулентных режимах пузырьков в значительной степени зависит от их геометрических характеристик [1, 2]. В теоретических формулах (27) и (28) данное обстоятельство не учитывается, так как при их выведении было принято допущение о том, что образующиеся в процессе работы пневматической системы аэрации пузырьки воздуха имеют строго сферическую форму и коэффициент дисперсности $K_{\rm A}$ =6.

В работе [5] дано уравнение, позволяющее учитывать эффект изменения формы всплывающих в турбулентном режиме пузырьков воздуха при определении величины пленочного коэффициента массопередачи:

$$K_L = \sqrt{\frac{2}{3} K_{\Lambda} \frac{D_{\text{T}\Lambda} \upsilon_{\text{II}}}{d_{\text{II}}}}, \text{ m/c}.$$
 (34)

Величина теоретического значения коэффициента использования кислорода воздуха, учитывающего эффект изменения формы пузырька воздуха, может быть получена из формулы (14) с учетом (18) и (34):

$$K_{_{\mathrm{H}}} = K_{_{W}} \frac{H}{I} \frac{C_{_{\mathrm{H}}} - C}{C_{_{\mathrm{KB}}}} = \frac{K_{_{\mathrm{H}}}}{d_{_{\mathrm{\Pi}}}} \frac{I}{\upsilon_{_{\mathrm{\Pi}}}} \frac{h^{0.67}}{H} K_{_{L}} \frac{H}{I} \frac{C_{_{\mathrm{H}}} - C}{C_{_{\mathrm{KB}}}} =$$

$$= \frac{K_{_{\mathrm{H}}}}{d_{_{\mathrm{\Pi}}} \upsilon_{_{\mathrm{\Pi}}}} h^{0.67} \sqrt{\frac{2}{3}} K_{_{\mathrm{H}}} \frac{D_{_{\mathrm{TA}}} \upsilon_{_{\mathrm{\Pi}}}}{d_{_{\mathrm{\Pi}}}} \frac{C_{_{\mathrm{H}}} - C}{C_{_{\mathrm{KB}}}}.$$
(35)

Подставлив в формулу (35) формулы (21) и (22) и значения h = 1 м; $C_{
m H}=0,00946~{
m kg/m}^3;~C=0,002~{
m kg/m}^3;~C_{
m KB}=0,278~{
m kg/m}^3$, получим:

$$K_{\text{HTI}} = \frac{753,3d_{\Pi}^{0,733}}{d_{\Pi}} \frac{d_{\Pi}^{0,438}}{0,0206} 1^{0,67} \sqrt{\frac{2}{3}} 753,3d_{\Pi}^{0,733} \frac{0,0206}{d_{\Pi}^{0,438}} \frac{D_{\text{TД}}}{d_{\Pi}} \frac{0,00946 - 0,002}{0,278} = \frac{3156,22}{d_{\Pi}^{0,182}} \sqrt{D_{\text{TД}}}.$$
(36)

Подставив в формулу (35) формулы (23) и (24) и значения $C_{
m H} = 0,00946~{
m kg/m}^3;~~C = 0,002~{
m kg/m}^3;~~C_{
m kb} = 0,278~{
m kg/m}^3$, получим:

$$K_{\text{HAI}} = \frac{219, 2d_{\Pi}^{0,5}}{d_{\Pi}0, 8d_{\Pi}^{0,25}} 1^{0.67} \sqrt{\frac{2}{3}} 219, 2d_{\Pi}^{0,5} \frac{0, 8d_{\Pi}^{0,25}}{d_{\Pi}} D_{\text{TД}} \frac{0,00946 - 0,002}{0,278} = \frac{79, 5}{d_{\Pi}^{0,875}} \sqrt{D_{\text{TД}}}.$$
(37)

Допущение о том, что полуэмпирическая формула (32), выведенная с использованием теории подобия, при исследовании мелкопузырчатой системы аэрации позволяет при диаметре образующихся пузырьков воздуха $d_{\Pi} = 4 \cdot 10^{-3}$ м получить величину коэффициента использования воздуха, равную значению $K_{\rm H}$, вычисленную по формуле (35), дает возможность определить величину коэффициента турбулентной диффузии $D_{\rm TД}$, м²/с. При диаметре пузырька воздуха $d_{\rm II}$ =4·10⁻³м величина коэффициента дисперсности, рассчитанная по формуле (22), будет иметь значение $K_{\rm д}$ =13,2, и величина скорости всплывания пузырька, рассчитанная по формуле (21), будет иметь значение $\upsilon_{\rm J}$ = 0,23 м/с. В этом случае будет соблюдаться равенство

$$K_{\rm H} = 2.3 \frac{C_{\rm H} - C}{C_{\rm KB}} = \frac{13.2}{4.0 \cdot 10^{-3} 0.23} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{13.2 \frac{D_{\rm TД} 0.23}{4.0 \cdot 10^{-3}} \frac{C_{\rm H} - C}{C_{\rm KB}}},$$
 (38)

откуда $D_{\rm TJI} = 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{c}$

С учетом значения $D_{\rm TД} = 5,1\cdot 10^{-4}\,$ м²/с формулы (36) и (37) запишутся в виде

$$K_{\text{MTI}} = \frac{0.02254}{d_{\text{II}}^{0.182}};\tag{39}$$

$$K_{\text{MAI}} = \frac{0,00057}{d_{\text{II}}^{0.875}} \,. \tag{40}$$

Величина коэффициента турбулентной диффузии $D_{\rm TД}$ также может быть определена путем приравнивания друг к другу значений коэффициентов использования кислорода воздуха, определенных по формулам (25) и (35) при величинах $d_{\rm II}=4\cdot 10^{-3}\,$ м и $D_{\rm TД}=1,8\cdot 10^{-9}\,$ м 2 /с.

$$K_{\rm H} = \frac{6}{d_{\rm \Pi} \upsilon_{\rm \Pi}} 2 \sqrt{\frac{1,8 \cdot 10^{-9}}{3,14}} \frac{\upsilon_{\rm \Pi}}{d_{\rm \Pi}} \frac{C_{\rm H} - C}{C_{\rm KB}} = \frac{13,2}{d_{\rm \Pi} \upsilon_{\rm \Pi}} \sqrt{\frac{2}{3}} 13, 2 \frac{\upsilon_{\rm \Pi}}{d_{\rm \Pi}} D_{\rm TД} \frac{C_{\rm H} - C}{C_{\rm KB}}, \quad (41)$$

откуда $D_{\rm TД} = 5, 4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{c}.$

Принимая во внимание, что коэффициент турбулентной диффузии кислорода воздуха $D_{\rm TД}$ в формуле (35) фигурирует в степени 0,5, точность полученных значений

$$\sqrt{D_{\rm TД}} = \sqrt{5,1\cdot 10^{-11}} = 7,1\cdot 10^{-6} \approx 7\cdot 10^{-6}$$
 и $\sqrt{D_{\rm TД}} = \sqrt{5,4\cdot 10^{-11}} = 7,3\cdot 10^{-6} \approx 7\cdot 10^{-6}$ для практических расчетов можно считать удовлетворительной.

В таблице приведены значения:

- коэффициентов использования кислорода воздуха $K_{\rm HI}$, вычисленных по формуле (33) при различных величинах $d_{\rm II}$, м;
- коэффициентов использования кислорода воздуха $K_{\rm HI}$, вычисленных по формулам (39) и (40) при различных величинах $d_{\rm II}$, м;
- коэффициентов использования кислорода воздуха $K_{\rm HI}$, вычисленных по формулам (27) и (28) при различных величинах $d_{\rm II}$, м;
- относительной разности Δ_1 , %, величин коэффициентов $K_{\rm HI}$, вычисленных по формуле (33) и формулам (39), (40);
- относительной разности Δ_2 , %, величин коэффициентов $K_{\text{ИI}}$, вычисленных по формуле (33) и формулам (27), (28).

Представленные в таблице данные показывают, что относительная разность величин коэффициентов использования кислорода воздуха, вычисленных по формуле (33) и формулам (39)–(40), составляет 0...12,2 %, а относительная разность величин коэффициентов использования кислорода воздуха, вычисленных по формуле (33) и формулам (27)–(28), составляет 1,6...54,5 %.

Результаты вычислений величин коэффициентов использования кислорода воздуха $K_{\rm N1}$ в системе пневматической аэрации

Технологические показатели пневматической системы аэрации	Величины технологических показателей пневматической системы аэрации							
Средний диаметр пузырьков	3	4	5	6	7	8	9	10
воздуха $d_{\Pi} \cdot 10^{-3}$ м								
Коэффициент использования	0,074	0,061	0,052	0,046	0,042	0,038	0,035	0,033
кислорода воздуха $K_{\rm HI}$, вы-								
численный по формуле (33)								
Коэффициент использования	0,065	0,062	0,059	0,050	0,044	0,039	0,035	0,032
кислорода воздуха $K_{\rm HI}$, вы-								
численный по формулам (39)								
и (40)								
Коэффициент использования	0,092	0,063	0,048	0,035	0,027	0,022	0,018	0,015
кислорода воздуха $K_{\rm M1}$, вы-								
численный по формулам (27)								
и (28)								
Δ_1 , %	12,2	1,6	11,9	8,0	4,5	2,6	0,0	3,0
Δ_2 , %	19,6	1,6	7,7	23,9	35,7	42,1	48,6	54,5

В работе [6] приведены графики зависимостей стандартной эффективности переноса кислорода воздуха СЭПК₃ (SOTE), %, для тарельчатого и трубчатого пневматических аэраторов при глубине погружения аэратора h=3 м (рис. 2).

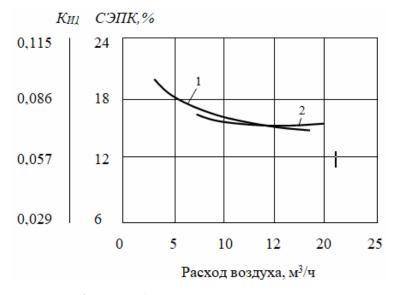


Рис. 2. Массообменные характеристики аэраторов: 1 – тарельчатый аэратор; 2 – трубчатый аэратор

На рис. 2 наряду со шкалой СЭПК₃, %, представлена и шкала значений коэффициента использования кислорода воздуха при глубине погружения аэратора 1 м $K_{\rm HI}$, вычисленных по формуле

$$K_{\rm H} = \frac{\text{C} \Im \Pi \text{K}_3}{100 h^{0.67}} = \frac{\text{C} \Im \Pi \text{K}_3}{100 \cdot 3^{0.67}} = \frac{\text{C} \Im \Pi \text{K}_3}{209}.$$
 (42)

Представленные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что трубчатый аэратор имеет более стабильные значения масообменных характеристик. При увеличении расхода подаваемого на трубчатый аэратор сжатого воздуха с 5 м³/ч до 20 м³/ч величина коэффициента использования кислорода воздуха имеет практически постоянное значение $K_{\rm HI}=0,070$. При увеличении расхода подаваемого на тарельчатый аэратор сжатого воздуха с 5 м³/ч до 20 м³/ч коэффициент использования кислорода воздуха уменьшается с $K_{\rm HI}=0,086$ до $K_{\rm HI}=0,069$.

Выполненный анализ известных теорий массопередачи кислорода воздуха из всплывающих в воде в турбулентных режимах пузырьков, подаваемых пневматическими системами аэрации, показал, что кинетика процесса массопередачи кислорода в значительной степени зависит от геометрических характеристик пузырьков воздуха. Полученные уравнения (39) и (40) позволяют учитывать степень деформации всплывающих в турбулентных режимах пузырьков воздуха и адекватно описывают работу пневматических систем аэрации.

Список литературы

- 1. Худенко, Б.М. Аэраторы для очистки сточных вод / Б.М. Худенко, Е.А. Шпирт. М.: Стройиздат, 1973. 112 с.
- 2. Попкович, Г.С. Системы аэрации сточных вод / Г.С. Попкович, Б.Н. Репин. М.: Стройиздат, 1986.
- 3. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. М.: Энергия, 1976. 297 с.
- 4. Andreev, S.Y. Evaluating the patterns of air bubble rise in water-air mixtures used in natural and waste water treatment processes / S.Y., Andreev I.A. Garkina, M.I. Yakhkind // IOP Conf. Ser. Mat. Sci. Eng. 2019. Vol. 687, No. 6. 066054.
- 5. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование кинетики процессов массопередачи из всплывающих газовых пузырьков в технологиях очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, А.А. Петрунин, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. -2013. №3 С. 134–139.
- 6. Мешенгисер, Ю.М. Теоретическое обоснование и разработка новых полимерных аэраторов для биологической очистки сточных вод: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю.М. Мешенгисер. М., 2005. 48 с.

References

- 1. Khudenko, B.M. Aerators for wastewater treatment / B.M. Khudenko, E.A. Shpirt. M.: Stroyizdat, 1973. 112 p.
- 2. Popkovich, G.S. Wastewater aeration systems / G.S. Popkovich, B.N. Repin. M.: Stroyizdat, 1986.
- 3. Kutateladze, S.S. Hydrodynamics of gas-liquid systems / S.S. Kutateladze, M.A. Styrikovich. M.: Energiya, 1976. 297 p.
- 7. Andreev, S.Y. Evaluating the patterns of air bubble rise in water-air mixtures used in natural and waste water treatment processes / S.Y., Andreev I.A. Garkina, M.I. Yakhkind // IOP Conf. Ser. Mat. Sci. Eng. 2019. Vol. 687, No. 6. 066054.
- 5. Andreev, S.Yu. Mathematical modeling of the kinetics of mass transfer processes from pop-up gas bubbles in wastewater treatment technologies / S.Yu. Andreev, V.G. Kamburg, A.A. Petrunin, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. 2013. No. 3. P. 134–139.
- 6. Meshengiser, Yu.M. Theoretical justification and development of new polymer aerators for biological wastewater treatment: abstract of the dis. ... of Doctor of Sciences / Yu.M. Meshengiser.—M., 2005.—48 p.

УДК 620.9

АО «Радиозавод»

Россия, 440039, г. Пенза, ул. Байдукова, д. 1, тел.: (8412) 92-80-96; факс (8412) 49-60-24

Моисеев Алексанар Сергеевич,

начальник отдела НТЦ E-mail: a.s.moiseev@rf58.ru

Рябихин Сергей Петрович

кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист НТЦ E-mail: s.p.ryabihin@mail.ru

ΟΟΟ «ΓΕΛΙΙΟΒΑΤΤ»

Россия, 663080, Красноярский край, г. Дивногорск, с. Овсянка, ул. Набережная, 111

Архутич Денис Петрович,

директор

E-mail: heliovatt@yandex.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Андреев Сергей Юрьевич,

доктор технических наук, профессор кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» E-mail: andreev3007@rambler.ru

AO Radiozavod

Russia, 440039, Penza, 1, Baidukova St., tel.: (8412) 42-80-96; fax: (8412) 49-60-24

Moiseev Aleksandr Sergeevich,

Chief of Research and Development Center

department

E-mail: a.s.moiseev@rf58.ru

Ryabihin Sergey Petrovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor, Head Specialist of Research and Development

Center

E-mail: s.p.ryabihin@mail.ru

LLL HELIOVATT

Russia, 663080, Krasnoyarsk Region, Divnogorsk, Ovsyanka village, 111, Naberezhnaya St.

Arhutich Denis Petrovich,

Director

E-mail: heliovatt@yandex.ru

Penza State University of Architecture

and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St., tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Andreev Sergey Yuryevich,

Doctor of Sciences, Professor of the department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering» E-mail:andreev3007@rambler.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛЫХ МОБИЛЬНЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В КАЧЕСТВЕ ОБЪЕКТОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А.С. Моисеев, С.П. Рябихин, Д.П. Архутич, С.Ю. Андреев

Приведены результаты теоретических исследований перспектив использования малых мобильных гидроэлектростанций в качестве объектов возобновляемой энергетики. Представлено описание натурных испытаний микроГЭС «Гидроватт-150». Показано, что разработанная конструкция микроГЭС позволяет в условиях рек со скоростью течения воды от 1,0 до 1,5м/с получить номинальную мощность от 0,043 до 0,146 кВт.

Ключевые слова: малая гидроэнергетика, скорость течения, гидравлическая турбина, мощность потока, крутящий момент, электрогенератор

USE OF SMALL MOBILE HYDRO POWER PLANTS AS RENEWABLE ENERGY FACILITIES

A.S. Moiseev, S.P. Ryabikhin, D.P. Arkhutich, S.Yu. Andreev

The results of theoretical studies of the prospects for using small mobile hydroelectric power plants as renewable energy facilities are presented. The description of full-scale tests of micro HPP «Gidrovat 150» is presented. It is shown that the developed design of a micro hydroelectric power station allows, in the conditions of rivers with a water flow rate from 1.0 m/s to 1.5 m/s, to obtain a rated power from 0.043 to 0.146 kW.

Keywords: small hydropower, flow rate; hydraulic turbine, flow power, torque, electric generator

В настоящее время одним из наиболее эффективных направлений развития возобновляемой энергетики является использование энергии небольших водотоков с помощью микро- и малых гидроэлектростанций (ГЭС). Энергетический потенциал малой гидроэнергетики в России превышает потенциал таких возобновляемых источников энергии, как ветер, солнце и биомасса, вместе взятых.

По данным государственного гидрологического института, в России насчитывается более 2,5 миллиона рек, в том числе 146697 малых рек и 281287 самых малых рек длиной от 0,5 до 10 км [1]. Несмотря на то что малые и самые малые реки обладают значительным потенциалом возобновляемой энергии, использование ее сталкивается со значительными трудностями.

МГЭС относятся к области малой гидроэнергетики. Они находят применение в качестве стационарных или мобильных автономных установок для получения электрической энергии в непосредственной близости от маломощных потребителей: мелких хозяйств, мастерских, коттеджей, дачных поселков, объектов агропромышленного комплекса и так далее. В настоящее время их разработке и применению уделяется большое внимание за рубежом и в меньшей степени в России, при этом практически не рассматриваются МГЭС для малых и самых малых рек с низкой скоростью течения воды.

Разрабатываемая микроГЭС должна отвечать следующим требованиям:

- быть работоспособной без применения плотин, искусственных и естественных гидрологических сооружений;
- быть мобильной, то есть отвечать требованиям по массе и габаритам и быть легкосборной без привлечения специальных средств;
 - быть эффективной;
- иметь низкую стоимость, обеспечивающую стоимость вырабатываемой электроэнергии, сопоставимую со стоимостью электросети.

Таким требованиям отвечает наплавная мобильная микроГЭС.

Наплавная микрогидроэлектростанция (наплавная МГЭС) предназначена для преобразования кинетической энергии свободно протекающего водного потока в электрическую энергию. Основными ее агрегатами являются гидравлическая турбина и генератор.

Конструкция мобильной наплавной микроГЭС должна обеспечивать работоспособность в условиях рек со скоростью течения от $1,0\,$ м/с при глубине реки от $1,0\,$ м; масса и габариты должны позволять разворачивать и устанавливать ее в водном потоке силами двух специалистов без применения вспомогательного оборудования при температуре окружающего воздуха $0...+45\,$ °С и отсутствии ледяного покрова.

На основе проведенного анализа конструкции существующих наплавных микро-ГЭС можно выделить их основные составные части: средство плавучести в виде катамарана или моноблока, гидравлическую турбину, повышающий редуктор (в отдельных случаях), генератор, устройства для повышения скорости воды (конфузор, диффузор), силовой кабель, систему удержания наплавной конструкции на месте, элементы защиты турбины от крупного мусора [2, 3].

В случае больших массы и габаритов для спуска на воду используется грузоподъемное устройство, а для установки изделия в требуем месте применяется буксирование. Накопители электрической энергии, преобразователи тока на плавающей части не устанавливаются.

Для оценки технологических параметров наплавных микроГЭС может использоваться следующая методика расчета [3].

Мощность потока воды рассчитывается по зависимости

$$N_{\text{вод}} = g \cdot Q \cdot H \cdot \rho \text{ (BT)},$$
 (1)

где g – ускорение свободного падения, м/c²; Q – расход воды, проходящей через заданную площадь, м³/c; H – скоростной напор потока воды, м; ρ – плотность воды, кг/м³.

Расход потока воды определяется по зависимости

$$Q = F \cdot V(\mathbf{M}^3/\mathbf{c}), \tag{2}$$

где F — площадь ометаемой поверхности лопастей турбины, \mathbf{m}^2 ; V — скорость потока воды, \mathbf{m}/\mathbf{c} .

Скоростной напор потока воды реки вычисляется по зависимости

$$H = V^2 / 2g \text{ (M)}. \tag{3}$$

После подстановки в зависимость (1) значений расхода потока воды (2) и напора воды (3) получим:

$$N_{\text{вод}} = \rho \, F V^3 / 2 \, (\text{Bt}).$$
 (4)

Значения мощности в зависимости от скорости водного потока и площади представлены на рис. 1.

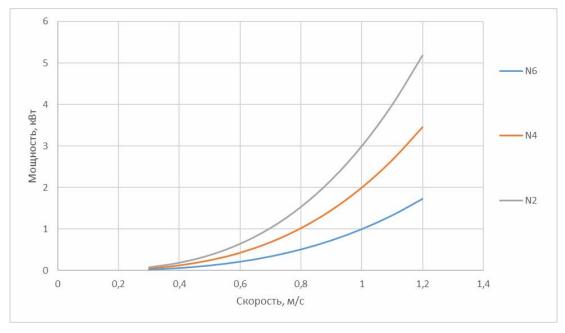


Рис. 1. Влияние скорости водного потока и активной площади турбины на мощность: N2 — площадь ометаемой поверхности лопаток турбин F=2 м 2 ; N4 — площадь ометаемой поверхности лопаток турбин F=4 м 2 ; N6 — площадь ометаемой поверхности лопаток турбин F=6 м 2

Анализ полученных результатов показал, что при скорости водного потока 1 м/с мощность 3 кВт достигается при площади не менее 6 m^2 .

Турбины, применяемые в малой гидроэнергетике, в зависимости от скорости вращения можно подразделять на низко-, средне- и высокоскоростные (табл. 1).

Таблица 1 Отдельные параметры турбин

Классификация	Частота вращения, об./мин	кпд	Удельная мощность МГЭС, Вт/кг	Образцы
Низкоскоростные	до 60	до 0,2	0,020,05	Турбины Угринского,
				Кажинского, Савониса,
				водяное колесо
Среднескоростные	до 250	до 0,4	0,10,25	Турбины ортогональные,
				Дарье, Банки
Высокоскоростные	свыше 250	до 0,45	от 2,0	Турбины пропеллерного
				типа

Низкоскоростные турбины имеют КПД $h \le 0,2$, среднескоростные — в отдельных случаях до $h \le 0,4$ и высокоскоростные — до $h \le 0,45$. В современных наплавных микроГЭС представлены, как правило, средне- и высокоскоростные турбины.

В качестве недостатка низко- и среднескоростных турбин можно отметить существенную нестабильность крутящего момента в зависимости от угла поворота относительно вектора скорости водного потока.

Существующие промышленные генераторы имеют номинальные параметры мощности в диапазоне высоких скоростей вращения ротора. Значения скоростей вращения низко- и среднескоростных турбин значительно меньше требуемых для генератора.

Для приведения в действие генератора от низко- и среднескоростных турбин имеются два решения: использовать низкооборотный генератор или повышающий редуктор (мультипликатор). Эти решения могут использоваться одновременно.

Однако низкооборотный генератор на постоянных магнитах в настоящее время имеет малое распространение, относительно большие массу и стоимость. Использование мультипликатора приведет к снижению КПД МГЭС, увеличению массы, стоимости, снижению ресурса и надежности.

Каждая турбина в зависимости от типа и массогеометрических параметров имеет максимальную мощность и определенную скорость вращения при заданной скорости течения воды. Отклонение значения скорости течения воды от номинального приводит к резкому уменьшению мощности. Причем это происходит как при уменьшении, так и при увеличении скорости. По некоторым оценкам, интервал значения скорости, в пределах которого уменьшение мощности достигает 30 % от максимального, составляет 0,25...0,3 м/с.

Немаловажным является показатель удельной материалоемкости. Увеличение массы в конечном счете приводит к снижению мобильности МГЭС, требует привлечения больших сил и времени при ее разворачивании и, как следствие, к увеличению себестоимости.

Для формулировки конструктивных требований был проведен анализ влияния вида исполнения МГЭС на величину коэффициента полезного действия. В качестве вариантов исполнения рассматривалась возможность применения водяного колеса и пропеллерной турбины.

Мощность электроэнергии, вырабатываемой наплавной МГЭС, зависит от мощности водного потока и от потерь:

$$N_{\text{MFЭC}} = h_{\text{MFЭC}} N_{\text{BOII}}, \tag{5}$$

 $h_{\text{мгэс}}$ – суммарный КПД.

Потери будут происходить при преобразовании энергии водного потока в крутящий момент гидротурбины, то есть гидравлические потери, и при получении электроэнергии.

В табл. 2 представлены значения КПД узлов и агрегатов, составляющих цепь преобразования энергии водного потока в электрическую энергию.

Таблица 2 КПД отдельных элементов конструкции МГЭС

Образец МГЭС	Конфузор (диффузор)	Турбина	Мульти- пликатор	Генератор	КПДΣ
С турбиной	0,81,0	0,45	1,0	0,85	0,30,38
пропеллерного					
типа					
С турбиной	0,81,0	0,160,19	0,930,98	0,85	0,10,16
типа «водяное					
колесо»					

В случае принятия для какого-либо узла (конфузор, мультипликатор) значения КПД $h_i = 1$ предполагается, что данный узел в конструкции не используется.

Анализ представленных значений показал, что общий КПД МГЭС с турбиной пропеллерного типа в 2...3,8 раза превышает КПД МГЭС с турбиной типа «водяное колесо». Наибольшие потери происходят при преобразовании энергии поступательного движения воды в крутящий момент турбины. При передаче крутящего момента с турбины потерь можно избежать при жестком креплении ротора генератора на валу турбины.

Исходя из анализа конструктивных особенностей можно сформулировать следующие требования к варианту реализации гидроэлектроузла наплавной МГЭС:

- необходимо использовать высокоскоростную гидравлическую турбину;
- крутящий момент с гидротурбины на генератор должен передаваться непосредственно без использования какой-либо трансмиссии;
- генератор должен быть рассчитан из условия обеспечения максимальной мощности при заданной скорости вращения турбины;
- для получения номинальной мощности при скорости течения 0,9 ... 1,3 м/с возможна установка конфузора-диффузора, при скорости течения 1,3 ...1,6 м/с работа без конфузора-диффузора.

По техническим требованиям АО «Радиозавод» (г. Пенза) и ООО «Гелиоватт» (г. Красноярск) была разработана конструкция мобильной микроГЭС.

МГЭС пропеллерного типа должна включать следующие основные элементы:

- конфузор-диффузор;
- турбину пропеллерного типа;
- генератор;
- наплавную несущую конструкцию;
- устройство защиты турбин от крупного мусора;
- якорное и швартовное устройства.

Основные характеристики МГЭС пропеллерного типа приведены в табл. 3.

Таблица 3 Основные характеристики МГЭС-500 пропеллерного типа

Наименование параметры	Ед. изм.	Значения параметров
Номинальная скорость течения воды	м/с	1
Глубина потока воды	M	1
Номинальная мощность, не менее	Вт	150
Номинальное выходное линейное напряжение	В	24
под нагрузкой при номинальной скорости		
течения воды		
Длина кабеля	M	1,5
Число фаз обмоток, не менее	ШТ.	3
Номинальная частота выходного напряжения	Гц	Не менее 50
при номинальной скорости течения воды		
КПД генератора при номинальной выходной		не ниже 85 %
мощности, не менее	%	
Габаритные размеры	MM	2500×1150×1150
Macca	ΚГ	Не более 42
Температура окружающего воздуха в рабочем	°C	от 0°C до плюс 45°C
положении (при отсутствии ледового по-		
крытия)		
Температура окружающего воздуха при	°C	от минус 40^{0} С до плюс
хранении		45^{0} C
Режим эксплуатации		Непрерывный (сезонный)

При проведении натурных испытаний гидротурбины пропеллерного типа использовалась 3-лопастная МГЭС пропеллерного типа в сборе с генератором «СтокВатт200» (Ø 460) производства ООО «Гелиоватт» (г. Красноярск).

Для проверки функционирования данной МГЭС при малых скоростях течения водного потока использовался конфузор с соотношением входной и выходной площади $0.25~\text{m}^2/0.45~\text{m}^2$.

Внешний вид 3-лопастной гидротурбины с конфузором на несущей плавучей конструкции представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид 3-лопастной гидротурбины с конфузором на несущей плавучей конструкции

В ходе испытаний производились измерения изменений скорости течения воды при использовании конфузора. Измерение скорости течения воды, протекающей по конфузору, показало, что увеличение скорости течения воды происходит обратно пропорционально отношению площадей в широкой и узкой частях конфузора. Скорость течения воды перед турбиной, обеспечиваемая конфузором, составляет 0,6...0,8 м/с. Для повышения скорости течения перед турбиной необходимо увеличить расход воды путем увеличения площадей сечений конфузора.

C целью повышения мощности генератора была разработана конструкция микроГЭС «Гидроватт-150».

Общий вид микроГЭС «Гидроватт-150» показан на рис. 3.



Рис. 3 Общий вид микро ГЭС «Гидроватт-150»

Результаты, полученные в ходе натурных испытаний микроГЭС «Гидроватт-150», и расчетные значения ее выходной мощности представлены в табл. 3.

Таблица 3 Сравнительные результаты фактических и расчетных значений выходной мощности микроГЭС «Гидроватт-150»

Скорость потока	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Расчетная мощность	22	32	43	58	75	116	120	146
без диффузора, Вт								
Расчетная мощность	74	108	145	195	131	203	210	255,5
с диффузором, Вт								
Фактическая мощность	39	56	75	102	130	200	230	250
с диффузором, Вт								

Использование системы диффузор-конфузор для данной конструкции признано нецелесообразным при низких скоростях потока. Приращение мощности за его счет составило величину порядка 10...12 %, а не расчетные 40...60 %; себестоимость изготовления данного узла — порядка 50 % от общего значения, а масса — до 60 %. Кроме того, в ходе натурных испытаний выявилось, что увеличение массы и габаритов привело к ухудшению такой эксплуатационной характеристики, как удобство установки в водном потоке силами двух специалистов без привлечения дополнительных технических средств.

По результатам оценки технологических параметров, полученных в ходе проведения натурных испытаний, были определены направления дальнейшего развития данного проекта:

- уменьшение массы и габаритов за счет отказа от использования конфузора;
- разработка укладки для транспортирования и хранения;
- разработка конструктивных решений по повышению ресурса;
- снижение себестоимости и повышение технологичности изготовления.

Полученные в ходе натурных испытаний микроГЭС «Гидроватт-150» экспериментальные данные позволили сделать вывод о том, что разработанная конструкция микроГЭС позволяет в условиях рек со скоростью течения воды от 1,0 до 1,5 м/с при заданных геометрических размерах турбины получить номинальную мощность от 0,043 до 0,146 кВт. Увеличивать геометрические размеры разработаной микроГЭС нецелесообразно по технологическим и экономическим соображениям. Повысить мощность мобильной установки можно за счет использования каскада стандартных доработанных блоков «Гидроватт-150», имеющих типовые размеры, удобные для монтажа и мобильного применения.

Наплавная МГЭС может быть использована как самостоятельный источник энергии, так и в качестве составной части мобильного энергетического комплекса.



Рис. 4. Общий вид мобильного энергетического комплекса

На рис. 4 приведен общий вид мобильного энергетического комплекса, представленного на Международном военно-техническом форуме «Армия-2020». В его состав входят солнечные батареи, ВЭУ, накопители электроэнергии и резервный дизельгенератор. Управление работой первичных источников генерации электроэнергии, заряда НЭЭ и обеспечением потребителей электроэнергией осуществляется единой автоматизированной системой.

Список литературы

- 1. Руководство по гидрологической практике. Т. II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. 6-е изд. М.: Всемирная метеорологическая организация, 2012. 324 с.
- 2. Обухов, С.Г. Микрогидроэлектростанции / С.Г. Обухов. Томск: ГОУВПОТПИ, 2009.-64 с.
- 3. Лукутин, Б.В. Автономное электроснабжение от микрогидроэлекростанций / Б.В. Луккутин, С.Г. Обухов, Е.Б. Шандарова. Томск: STT, 2001. 120 с.

References

- 1. Guide to Hydrological Practice. Vol. II. Water resources management and practice of applying hydrological methods. 6th edition. M.: World Meteorological Organization, 2012. 324 p.
- 2. Obukhov, S.G. Microhydroelectric power plants / S.G. Obukhov. Tomsk: GOUVPOTPI, 2009. 64 p.
- 3. Lukutin, B.V. Autonomous power supply from micro hydroelectric power plants / B.V. Lukkutin, S.G. Obukhov, E.B. Shandarova. Tomsk: STT, 2001. 120 p.

Указатель статей, опубликованных в 2020 г.

- 1. **Аверкин А.Г., Королева Т.И., Иващенко Н.Ю.** Моделирование процессов и совершенствование оборудования канальной естественной вентиляции. №1(42). С. 176–180.
- 2. **Андреев С.Ю., Вилкова Н.Г., Сафронов М.А.** Закономерности процессов изменения гидродинамических характеристик ламинарного потока жидкости от величины его средней скорости. №3(44). С. 115-124.
- 3. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Князев А.А., Долгушев М.С.** Исследование технологического процесса электрохимического синтеза феррата натрия в анодных ячейках мембранного электролизера. №2(43). С. 142–149.
- 4. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Сафронов М.А.** Уточненная методика определения значений гидродинамических характеристик пристеночного подслоя турбулентного потока. №3(44). С. 125–139.
- 5. **Андреев С.Ю., Ласьков Н.Н., Князев А.А., Долгушев М.С.** Исследование кинетики процесса разложения ферратов в растворах гидроксида натрия, прошедших электроактивационную обработку. №2(43). С. 150–156.
- 6. Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Князев В.А. Новая методика расчета процессов массопередачи кислорода воздуха в пневматических системах аэрации. N04(45). С. 144—155.
- 7. **Астахова И.С., Жданова Л.Р.** Природный камень в архитектурном оформлении г. Сыктывкара: история, сохранение и реставрация. №3(44). С. 182–188.
- 8. **Бакушев С.В.** Аппроксимация диаграмм объёмного и сдвигового деформирования конструкционных материалов билинейными функциями. №2(43). С. 76–87.
- 9. **Бакушев С.В.** Дифференциальные уравнения равновесия осесимметричной деформации идеально упругопластического элемента конструкции при сложном напряжённом состоянии. №1(42). С. 140–155.
- 10. **Бакушев С.В., Шацкая Г.С.** Численно-аналитическое определение перемещений в полуплоскости при воздействии нормальных и касательных нагрузок. − №3(44). С. 46–56.
- 11. **Баронин С.А., Еремкин А.И., Пономарева И.К.** Развитие национальных проектов на основе контрактов на жизненные циклы по объектам капитального строительства. N2(43). С. 100–108.
- 12. **Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Карташов А.А., Юрова В.С.** Современные бетоны с использованием реакционно- и реологически-активных порошков из горных пород. N2(45). С. 64–72.
- 13. **Береговой А.М.** Влияние дефектов конструкций крыш на энергоэффективность зданий. №2(43). С. 71–75.
- 14. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Вопросы энергосбережения в условиях вариабельности воздухопроницания ограждающих конструкций. №3(44). С. 57–60.
- 15. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Теплопередача через энергоактивную конструкцию наружной стены. -№1(42). C. 130–134.
- 16. **Береговой В.А., Болдырев С.А., Капустин А.Е., Субботин А.М., Петров С.А., Мальчевский В.А.** Влияние добавки экзометаболитов микроорганизма bacillus cereus на прочность цементных растворов. №2(43). С. 5–15.
- 17. **Береговой В.А., Болдырев С.А., Лавров И.Ю.** Цифровые технологии в исследовании механических свойств тонкослойных материалов. №4(45). С. 5–11.

- 18. **Береговой В.А., Лавров И.Ю.** 3D-принтер для печати строительной керамики. №1(42). С. 32—44.
- 19. **Будылина Е.А., Гарькина И.А, Данилов А.М.** Ветвящиеся процессы в оценке риска. №2(43). С. 88–93.
- 20. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Из опыта системного проектирования композиционных материалов. №2(43). С. 16–23.
- 21. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Некоторые аспекты имитационного моделирования сложных управляемых систем. №4(45). С. 131–136.
- 22. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Проблемы реализации системного подхода в строительной отрасли. №3(44). С. 140–145.
- 23. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Синтез композитов: обработка данных. №4(45). С. 40–45.
- 24. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Формализованное описание частных критериев строительных материалов. №1(42). С. 25–31.
- 25. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Человеческий фактор в моделировании и управлении сложными системами. – №3(44). – С. 146–151.
- 26. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Кузина В.В., Варенцова В.И. Композиционные и нанокомпозиционные материалы на основе углеродных волокнистых материалов: моделирование и эксперимент. \mathbb{N} 2(45). С. 73–79.
- 27. Варенцов В.К., Кузина В.В., Кошев А.Н. Моделирование процессов массопереноса в проточных трехмерных электродах для очистки сточных вод. - №4(45). - С. 116–120.
- 28. Васин Л.А. Концепция регулирования освещения в инженерных системах управления жилым домом. №1(42). С. 181–186.
- 29. Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Мазурин Н.Н. Пенообразование в сточных водах: формирование устойчивых пен и метод их ускоренного разрушения. №2(43). С. 157–163.
- 30. Вилкова Н.Г., Фокин Г.А., Мишина С.И., Мазурин Н.Н. Ультразвуковая обработка суспензий для получения устойчивых трехфазных пен и материалов с улучшенными свойствами. №1(42). С. 37.
- 31. **Гарькин И.Н., Лаштанкин А.С.** Результаты испытаний крановых арочных рельсов. №2(43). С. 109–119.
- 32. **Гарькин И.Н., Лаштанкин А.С.** Циклические испытания подкрановых балок на выносливость. -№3(44). С. 68-77.
- 33. **Гарькин И.Н., Саденко Д.С.** Деформативно-прочностные свойства монолитных железобетонных перекрытий. №1(42). С. 126–129.
- 34. **Гарькина И.А.**, **Данилов А.М.** Методы системного анализа в проектировании композитов. №1(42). С. 63–68.
- 35. **Гельфонд А.Л., Моисеенко В.А., Ерофеева И.В.** Олимпийский комплекс Мюнхена как предвестник деконструктивизма. №1(42). С. 195–211.
- 36. **Герасимов В.П., Валиахметов Р.М.** Устойчивость плоской формы изгиба деревянных криволинейных элементов в зависимости от направления изгибающего момента и расположения связей. №3(44). С. 96–101.
- 37. **Гришин Б.М., Бикунова М.В., Кошев А.Н., Перелыгин Ю.П.** Удаление аммонийного азота из городских сточных вод с применением физико-химического и биологического методов. №2(43). С. 134–141.
- 38. **Гришин Б.М., Бикунова М.В., Кошев А.Н., Шеин А.И.** Эффективность коагуляционной обработки воды при безнапорном перемешивании пузырьками воздуха различной дисперности. №1(42). С. 162–168.
- 39. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.** Оценка состояния и усиление железобетонных плит перекрытия склада химических реагентов станции очистных сооружений. №3(44). С. 61–67.
- 40. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Колос В.С.** Сборно-монолитный каркас высотного здания для условий Севера. -№1(42). С. 113–118.

- 41. **Дерина М.А., Петрянина Л.Н.** Применение индустриальных стеновых конструкций в различных природно-климатических условиях. №2(43). С. 120–126.
- 42. **Дмитриев К.С.** Методика расчета предела прочности при сжатии аэрированных керамических изделий по химическому составу шихты. №1(42). С. 16–24.
- 43. Домке Э.Р., Жесткова С.А., Барсукова А.И. Оптимизация системы доставки массового строительного предприятия груза автомобильным транспортом. №3(44). С. 152–160.
- 44. **Еремкин А.И.** Особенности применения вытесняющей вентиляции в системах кондиционирования воздуха в залах богослужения православных соборов и храмов. №2(43). С. 127–133.
- 45. **Еремкин А.И., Пономарева И.К.** Методика расчета воздухообмена системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов. №3(44). С. 161–168.
- 46. **Еремкин А.И., Пономарева И.К.** Совершенствование путей энергосбережения объектов капитального строительства при реализации национальных проектов. − №3(44). С. 169–174.
- 47. **Еремкин А.И., Пономарева И.К., Петрова К.А., Багдасарян А.Г.** Пути повышения качества микроклимата в зале богослужения спасского кафедрального собора Γ . Пензы. №4(45). С. 121–130.
- 48. **Зернов В.В., Зайцев М.Б.** Методика определения несущей способности внецентренно сжатых колонн промышленных зданий в упругопластической стадии. $\mathbb{N}2(43)$. С. 94–99.
- 49. **Ильина Л.В., Туляганов А.К.** Применение минеральных волокон в штукатурных цементных смесях для повышения эксплуатационных характеристик раствора. N2(44). C. 5–11.
- 50. **Королев Е.В., Гришина А.Н.** Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала. №1(42). С. 5–15.
- 51. **Королева Т.И., Мельников И.Е., Иващенко Н.Ю.** Оценка эффективности сопротивления теплопередаче воздушной прослойки для неоднородной ограждающей конструкции. N1(42). С. 187–194.
- 52. **Кочеткова М.В.** Закономерности изменения разрушающей силы ростверков под колонну в зависимости от схемы расположения свай. N2(44). С. 91—95.
- 53. **Лапшина Е.Г., Сухов Я.И.** Динамическая архитектура в пространстве современного города. №2(43). С. 171–177.
- 54. **Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аласханов А.Х.** Вяжущее из пылевидной фракции фрагментов разрушенных зданий и сооружений Ирака. №1(42). С. 69–76.
- 55. **Логанина В.И.** Контроль качества лакокрасочных покрытий. №3(44). С. 12–16.
- 56. **Логанина В.И., Кислицына С.Н.** Известковые составы для реставрации известнякового камня. №2(43). С. 41–45.
- 57. **Логанина В.И., Куимова Е.И.** Достоверность контроля и погрешность измерения при допусковом контроле качества строительных материалов. №3(44). С. 17–21.
- 58. **Логанина В.И., Мажитов Е.Б.** Выбор наполнителя в рецептуре зольсиликатных красок. N24(45). С. 58–63.
- 59. **Логанина В.И., Мажитов Е.Б.** Оценка стойкости покрытий на основе зольсиликатной краски. №2(43). С. 33-40.
- 60. **Логанина В.И., Мажитов Е.Б.** Состав и свойства полисиликатного связующего для золь-силикатных красок. №4(45). С. 53–57.
- 61. **Логанина В.И., Сергеева К.А.** К методике измерения адгезии льда к поверхностям. №1(42). С. 86–89.
- 62. **Логанина В.И., Сергеева К.А.** Оценка супергидрофобных свойств покрытий на основе акриловой смолы. №1(42). С. 98–103.

- 63. **Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Баукова Н.С.** Оценка результативности корректирующих и предупреждающих действий при производстве емкостного оборудования. $\mathbb{N}2(43)$. С. 46–55.
- 64. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** О физико-химическом и техническом влиянии добавок модифицированных гидросиликатов кальция на процессы структурообразования и твердения цементного камня. №2(43). С. 24–32.
- 65. **Макридин Н.И., Максимова И.Н., Полубарова Ю.В.** Влияние фазовых превращений в процессе обжига опоки на ее физико-механические свойства. №1(42). C. 77–85.
- 66. Мацеевич Т.А., Поддаева О.И., Гришина А.Н., Корольченко Д.А. Анализ системы «здание (сооружение) строительная конструкция строительный материал». Общая и частные задачи. №4(45). С. 22—33.
- 67. **Мерщиев А.А., Шепс Р.А., Лобанов Д.В., Шашин А.В.** Определение величины потока прямого солнечного излучения, направленного на горизонтальную поверхность. N04(45). С. 137–143.
- 68. Моисеев А.С., Рябихин С.П., Архутич Д.П., Андреев С.Ю. Использование малых мобильных гидроэлектростанций в качестве объектов возобновляемой энергетики. \mathbb{N} 2(45). С. 156–163.
- 69. **Монахов В.А., Зайцев М.Б.** Методика определения конфигурации стержневой системы при внешнем воздействии. N2(44). С. 39–45.
- 70. **Нежданов К.К., Гарькин И.Н., Курткезов Д.Х.** Результаты испытаний неразрезных подкрановых конструкций. №3(44). С. 78–83.
- 71. **Нугманова Г.Г.** Губернские строительные комиссии в системе управления архитектурно-строительными практиками в России середины XIX века. №3(44). С. 175–181.
- 72. Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Родионов Ю.В., Тараканов О.В. Оптимизация систем газоснабжения населенных пунктов на основе газовоздушных смесей. $N \ge 3(44)$. С. 108-114.
- 73. **Очиров Н.Г., Лунегова А.А., Болотин А.В.** Вероятностная модель эксплуатационной надежности зданий. N2(44). С. 102–107.
- 74. **Очкина Н.А.** Теплофизические свойства композитов с высокоплотным заполнителем. №2(43). С. 63–70.
- 75. **Перелыгин Ю.П., Гришин Б.М., Салмин С.М.** Удаление соединений аммиака из водных растворов и сточных вод. – №4(45). – С. 110–115.
- 76. **Петрянина Л.Н., Дерина М.А., Сергунина Ю.С.** Концепция техникоэкономической оценки реконструкции городской застройки. – №1(42). – С. 212–217.
- 77. **Пучков Ю.М.** Деструкция кирпичных кладок и их защита от солевой коррозии. $\mathbb{N}_{2}(43)$. С. 56–62.
- 78. **Саденко Д.С., Гарькин И.Н.** Причины дефектов при производстве монолитных железобетонных конструкций, связанных с коррозией бетона. №4(45). С. 105–109
- 79. **Саргсян А.Е., Гукова Е.Г.** Оценка эффективности реализации свайных фундаментов. \mathbb{N} 1(42). С. 104–112.
- 80. **Селютина Л.Ф.** Деревянные конструкции здания постройки 1914 года в поселке Эссойла. №1(42). С. 119–125.
- 81. Селяев В.П., Неяскин А.В., Маврушкина Т.Н., Кечуткина Е.Л. Дисперсионный анализ влияния содержания минерального наполнителя МКУ-85 и суперпластификатора Хидетал-ГП-9 γ на однородность и прочность цементной композиции. №4(45). С. 12—21.
- 82. Селяев В.П., Селяев П.В., Безрукова Е.С., Кечуткина Е.Л. Изгиб балки из физически нелинейно деформируемого материала с фрактальной структурой. N04(45). С. 96—104.
- 83. **Селяев В.П., Селяев П.В., Горенков А.О., Безрукова Е.С.** Аналитическое описание диаграмм деформирования бетонов при сжатии. №3(44). С. 22–30.

- 84. Селяев В.П., Селяев П.В., Горенков А.О., Безрукова Е.С., Кечуткина Е.Л. Фрактальная модель прочности бетона с учетом масштабного эффекта структуры. N 3(44). С. 31–38.
- 85. **Снежкина О.В.** Моделирование работы железобетонных балок с относительным пролетом среза a/h_0 от 1 до 3. №1(42). С. 156–161.
- 86. **Стеклова И.А., Веслополова Г.Н., Стеклов А.М.** Светопространство города: между эмпирической и виртуальной реальностью. №2(43). С. 178–186.
- 87. **Тараканов О.В., Белякова Е.А.** Влияние комплексных минеральных добавок на прочность и состав гидратации цементных материалов. №4(45). С. 46–52.
- 88. **Тарасеева Н.И., Иванов Н.М., Прохиро С.А.** Методика конструирования и расчета опорных частей моста. N2(44). С. 84–90.
- 89. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Пикалов А.А. Разработка методических положений по предотвращению осаждения механических примесей в зазоре между фильтрующими картриджами предварительной и тонкой очистки газового двухступенчатого фильтра. $\mathbb{N}^{1}(42)$. С. 169–175.
- 90. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Усуев З.М. Разработка методических положений по предотвращению коррозии в зазоре между корпусом двухступенчатой установки очистки и быстросъемной крышкой. №2(43). С. 164–170.
- 91. **Фролов М.В.** Оценка влажностного режима в стенах из газобетона в зависимости от характеристик наружного отделочного покрытия. №1(42). С. 90–97.
- 92. **Хвастунов В.Л., Хвастунов А.В., Махамбетова К.Н.** Реакционные процессы каустификации и бруситизации в формировании структуры и свойств безобжиговых бесклинкерных минерально-шлаковых вяжущих. №4(45). С. 80–95.
- 93. **Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Черкасов Д.В.** Минеральная добавка на основе карбонизованного диатомита. №4(45). С. 34–39.
- 94. **Черкасов В.Д., Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Авдонин В.В.** Влияние полярности наполнителей на динамические свойства вибропоглощающих полимерных композиционных материалов на основе этиленвинилацетата. №1(42). С. 52—62.
- 95. **Черкасов В.Д., Смиркин А.С., Бородин А.В.** Вибропоглощающие свойства слоеных материалов. №1(42). С. 45–51.
- 96. **Шеин А.И., Зернов В.В., Зайцев М.Б.** Усиление несущих элементов ендов стропильных крыш. №1(42). С. 135–139.