

**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 исполь-
зование в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.

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

Подписано к печати 15.06.2020.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 23,25. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 64.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО**
2(43)/2020

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

**Береговой В.А., Болдырев С.А., Капустин А.Е.,
Субботин А.М., Петров С.А.,
Мальчевский В.А.**

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ЭКЗОМЕТАБОЛИТОВ
МИКРООРГАНИЗМА VASILLUS CEREUS
НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ... 5

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

ИЗ ОПЫТА СИСТЕМНОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ 16

Макридин Н.И., Максимова И.Н.

О ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОМ И ТЕХНИЧЕСКОМ
ВЛИЯНИИ ДОБАВОК МОДИФИЦИРОВАННЫХ
ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ
НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
И ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ 24

Логанина В.И., Мажитов Е.Б.

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ ЗОЛЬ-СИЛИКАТНОЙ КРАСКИ... 33

Логанина В.И., Кислицына С.Н.

ИЗВЕСТКОВЫЕ СОСТАВЫ
ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ ИЗВЕСТНЯКОВОГО
КАМНЯ 41

Макарова Л.В., Тарасов Р.В.,

Баукова Н.С.
ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ
КОРРЕКТИРУЮЩИХ
И ПРЕДУПРЕЖДАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЕМКОСТНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ..... 46

Пучков Ю.М.

ДЕСТРУКЦИЯ КИРПИЧНЫХ КЛАДОК
И ИХ ЗАЩИТА ОТ СОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ 56

Очкина Н.А.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИТОВ С ВЫСОКОПЛОТНЫМ
ЗАПОЛНИТЕЛЕМ 63

© Авторы публикаций, 2020

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2020

© ПГУАС, 2020

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	71	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.....	134
Береговой А.М. ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ КРЫШ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ	71	Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Князев А.А., Долгушев М.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ФЕРРАТА НАТРИЯ В АНОДНЫХ ЯЧЕЙКАХ МЕМБРАННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА	142
Бакушев С.В. АППРОКСИМАЦИЯ ДИАГРАММ ОБЪЕМНОГО И СДВИГОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ БИЛИНЕЙНЫМИ ФУНКЦИЯМИ	76	Андреев С.Ю., Ласьков Н.Н., Князев А.А., Долгушев М.С. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ФЕРРАТОВ В РАСТВОРАХ ГИДРОКСИДА НАТРИЯ, ПРОШЕДШИХ ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИОННУЮ ОБРАБОТКУ	150
Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. ВЕТВЯЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В ОЦЕНКЕ РИСКА	88	Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Мазурин Н.Н. ПЕНООБРАЗОВАНИЕ В СТОЧНЫХ ВОДАХ: ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ПЕН И МЕТОД ИХ УСКОРЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ	157
Зернов В.В., Зайцев М.Б. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ КОЛОНН ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СТАДИИ	94	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	164
Баронин С.А., Еремкин А.И., Пономарева И.К. РАЗВИТИЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОНТРАКТОВ НА ЖИЗНЕННЫЕ ЦИКЛЫ ПО ОБЪЕКТАМ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА	100	АРХИТЕКТУРА.....	171
Гарькин И.Н., Лаштанкин А.С. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КРАНОВЫХ АРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ.....	109	Лапшина Е.Г., Сухов Я.И. ДИНАМИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА В ПРОСТРАНСТВЕ СОВРЕМЕННОГО ГОРОДА	171
Дерина М.А., Петрянина Л.Н. ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНО- КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ	120	Стеклова И.А., Веслополова Г.Н., Стеклов А.М. СВЕТОПРОСТРАНСТВО ГОРОДА: МЕЖДУ ЭМПИРИЧЕСКОЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ	178
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ	127		
Еремкин А.И. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В ЗАЛАХ БОГОСЛУЖЕНИЯ ПРАВОСЛАВНЫХ СОБОРОВ И ХРАМОВ...	127		

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	71
Beregovoy V.A., Boldyrev S.A., Kapustin A.E., Subbotin A.M., Petrov S.A., Malchevskiy V.A.		Beregovoy A.M.	
THE INFLUENCE OF EXOMETABOLITE ADDITIVE OF BACILLUS CEREUS BACTERIUM ON THE STRENGTH OF CEMENT SOLUTIONS	5	INFLUENCE OF DEFECTS IN THE CONSTRUCTION OF ROOFS ON ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS.....	71
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.		Bakushev S.V.	
FROM EXPERIENCE OF SYSTEM DESIGN OF COMPOSITE MATERIALS	16	APPROXIMATION OF DIAGRAMS OF VOLUME AND SHEAR DEFORMATION OF STRUCTURAL MATERIALS BY BILINEAR FUNCTIONS.....	76
Makridin N.I., Maksimova I.N.		Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.	
ABOUT PHYSICAL-CHEMICAL AND TECHNICAL INFLUENCE OF ADDITIVES OF MODIFIED CALCIUM HYDRO SILICATES ON THE PROCESSES OF STRUCTURAL FORMATION AND CURING OF CEMENT STONE	24	BRANCHING PROCESSES IN RISK ASSESSMENT.....	88
Loganina V.I., Mazhitov E.B.		Zernov V.V., Zaitsev M.B.	
ASSESSMENT OF THE DURABILITY OF COATINGS ON SOL SILICATE PAINT.....	33	METHOD FOR DETERMINING THE BEARING CAPACITY OFF-CENTER COMPRESSED COLUMNS OF INDUSTRIAL BUILDINGS IN THE ELASTIC-PLASTIC STAGE	94
Loganina V.I., Kislitsyna S.N.		Baronin S.A., Eremkin A.I., Ponomareva I.K.	
LIME COMPOSITIONS FOR RESTORATION OF LIMESTONE	41	DIAGNOSTICS OF NATIONAL PROJECTS BASED ON CONTRACTS FOR LIFE CYCLES OF CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS	100
Makarova L.V., Tarasov R.V., Baukova N.S.		Garkin I.N., Lashtankin A.S.	
ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF IMPLEMENTING CORRECTIVE AND PREVENTIVE ACTIONS AS AN ELEMENT OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN THE PRODUCTION OF CAPACITIVE EQUIPMENT.....	46	TEST RESULTS OF CRANE ARCH RAILS ...	109
Puchkov Yu.M.		Derina M.A., Petryanina L.N.	
DESTRUCTION OF BRICK-WALLS AND THEIR PROTECTION AGAINST SALT CORROSION.....	56	APPLICATION OF INDUSTRIAL WALL STRUCTURES IN VARIOUS NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS.....	120
Ochkina N.A.		ENGINEERING SYSTEMS.....	127
THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF COMPOSITES WITH HIGH-DENSITY FILLER	63	Eremkin A.I.	
		PECULIARITIES OF APPLICATION OF EXHAUST VENTILATION IN AIR CONDITIONING SYSTEMS IN ORTHODOX CATHEDRALS AND TEMPLES.....	127

<p>Grishin B.M., Bikunova M. V., Koshev A. N., Perelygin Yu. P. REMOVAL AMMONIUM NITROGEN FROM URBAN WASTEWATER USING PHYSICAL- CHEMICAL AND BIOLOGICAL METHODS 134</p> <p>Andreev S.Yu., Garkina I.A., Knyazev A.A., Dolgushev M.S. TECHNOLOGICAL PROCESS STUDY OF SODIUM FERRATE ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS IN ANODE CELLS OF A MEMBRANE ELECTROLYZER..... 142</p> <p>Andreev S.Yu., Laskov N.N., Knyazev A.A., Dolgushev M.S. KINETICS INVESTIGATION OF FERRATES DECOMPOSITION SODIUM HYDROXIDE SOLUTIONS AFTER ELECTROACTIVATION TREATMENT 150</p>	<p>Vilkova N.G., Mishina S.I., Mazurin N.N. FOAMING IN WASTERWATER: FORMATION OF STABLE FOAMS AND METHOD FOR THEIR ACCELERATED DESTRUCTION 157</p> <p>Usachev A.P., Shuraitis A.L., Biryukov A.V., Usuev Z.M. CORROSION PREVENTION TECHNIQUE IN THE GAP BETWEEN A TWO-STAGE CLEANING UNIT AND A QUICK-RELEASE COVER..... 164</p> <p>ARCHITECTURE 171</p> <p>Lapshina E.G., Sukhov Ya.I. DYNAMIC ARCHITECTURE IN SPACE OF A MODERN CITY..... 171</p> <p>Steklova I.A., Veslopolova G.N., Steklov A.M. URBAN LIGHT SPACE: BETWEEN EMPIRICAL AND VIRTUAL REALITY 178</p>
---	--

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 678:691.32

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
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: techbeton@pguas.ru

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

Капустин Андрей Егорович,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»
E-mail: techbeton@pguas.ru

*Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный
исследовательский центр Тюменский
научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук (ТюмНЦ СО
РАН)*

*Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86,
тел.: +7(3452)688-787; факс: +7(3452) 688-771;
E-mail: fic@tmnsc.ru*

Субботин Андрей Михайлович,
кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник
E-mail: subbotin.prion@yandex.ru

Петров Сергей Анатольевич,
доктор медицинских наук, профессор,
главный научный сотрудник
E-mail: tumiki@mail.ru

Мальчевский Владимир Алексеевич,
доктор медицинских наук,
профессор Российской академии наук,
главный научный сотрудник
E-mail: malchevski@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

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Technology of Building Materials
and Wood Processing»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Boldyrev Sergey Aleksandrovich,
Candidate of technical Sciences,
Associate Professor of the department
«Building Structures»
E-mail: rector@pguas.ru

Kapustin Andrey Egorovich,
Postgraduate of the department «Technology
of Building Materials and Wood Processing»
E-mail: techbeton@pguas.ru

*Federal State Institution Federal Research
Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences
(Tyumen Scientific Centre SB RAS)*

*Russia, 625026, Tyumen 86, Malygina St.,
tel.: +7(3452)688-787; fax: +7(3452) 688-771;
E-mail: fic@tmnsc.ru*

Subbotin Andrey Mikhailovich,
Candidate of Biological Sciences,
Leading Researcher
E-mail: subbotin.prion@yandex.ru

Petrov Sergey Anatolyevich,
Doctor of Medical Sciences, Professor,
Chief Researcher
E-mail: tumiki@mail.ru

Malchevskiy Vladimir Alekseevich,
Doctor of Medical Sciences, Professor of the
Russian Academy of Sciences, Chief
Researcher
E-mail: malchevski@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ЭКЗОМЕТАБОЛИТОВ МИКРООРГАНИЗМА *BACILLUS CEREUS* НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ

В.А. Береговой, С.А. Болдырев, А.Е. Капустин, А.М. Субботин,
С.А. Петров, В.А. Мальчевский

Исследовано влияние экзометаболитов микроорганизма штамма *Bacillus cereus* на прочность цементных растворов. Установлены количественные показатели повышения прочности на сжатие и изгиб цементных составов с биодобавкой. Определены оптимальные концентрации биодобавок по показателям подвижности цементного раствора и условия протекания процесса биоцементации. Показана эффективность использования биодобавок применительно к цементным системам.

Ключевые слова: цементные растворы, механические и реологические свойства, биологические добавки, экзометаболиты *Bacillus cereus*

THE INFLUENCE OF EXOMETABOLITE ADDITIVE OF *BACILLUS CEREUS* BACTERIUM ON THE STRENGTH OF CEMENT SOLUTIONS

V.A. Beregovoy, S.A. Boldyrev, A.E. Kapustin, A.M. Subbotin,
S.A. Petrov, V.A. Malchevskiy

The effect of exometabolites of the microorganism of the strain *Bacillus cereus* on the strength of cement mortars is investigated. Quantitative indicators of increasing the compressive and bending strength of cement compositions with bioadditive are established. The optimal concentration of bioadditives was determined by the indicators of mobility of the cement mortar and the conditions of the process of biocementation. The effectiveness of the use of bioadditives in relation to cement systems is shown.

Keywords: cement mortars, mechanical and rheological properties, biological additives, exometabolites of *Bacillus cereus*

Введение. Предварительные опыты показали наличие положительного эффекта от введения экзометаболитов микроорганизма штамма *Bacillus cereus* на механические показатели твердеющих цементных систем. С учетом анализа ранее опубликованных результатов исследований выдвинуто несколько вариантов формирования механизма позитивного влияния биодобавки.

Первый основан на способности ряда микроорганизмов (*Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus subtilis*) синтезировать в процессе жизнедеятельности неорганические вяжущие вещества, которые с течением времени отвердевают с образованием прочных минеральных конгломератов [1...4]. В основе процесса «биоцементации» лежит метаболизм живой клетки, протекающий с образованием коллоидального CaCO_3 , который в результате эпитаксиального наращивания формирует массивы кальцита или его разновидностей (арагонита или ватерита). Известно, что отложение карбонатов под влиянием жизнедеятельности бактерий начинается в слизистых бактериальных образованиях [3]. Первоначально в слизи появляются небольшие капли коллоидального карбоната, который впоследствии кристаллизуется, обеспечивая рост кристаллических новообразований [4, 5]. Исходя из специфики колонизации бактериями нового объекта, процесс биоцементации самоускоряется по экспоненциальной зависимости, пока для этого присутствуют необходимые факторы (Ca^{2+} , H_2O , O_2 , N , K^+ и др.).

Второй механизм влияния биодобавки предполагает, что микроорганизмы в процессе жизнедеятельности продуцируют достаточное количество биосурфактантов в виде полимерных соединений с молекулами асимметричной структуры, обладающих поверхностно-активными свойствами. Потенциал использования таких веществ в технологии цементных систем заключается в их способности снижать величину поверхностного натяжения раствора, изменять гидрофильные свойства твердых поверхностей и морфологию гидратных новообразований.

Для проверки вышеприведенных гипотез были поставлены опыты, цель которых состояла в выяснении оптимальных концентраций добавки по показателям пластифицирующей способности и прочности.

Основная часть. Результаты исследований, представленные в работах [3...6], доказывают способность бактерий *Sporosarcina pasteurii* и *Bacillus subtilis* активировать процесс связывания частиц кварцевого песка в монолит. Это позволило разработать технологию микробиологически индуцированной преципитации карбоната кальция для производства строительных изделий. В качестве дополнительных компонентов, обеспечивающих твердение сырьевой смеси, использовали CaCl_2 и карбамид $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. Причиной активации деятельности бактерий является кальций в ионизированной форме, который обладает способностью активировать процессы, протекающие на мембранном и клеточном уровнях [6, 7].

В работах профессора Ерофеева В.Т. представлены результаты исследования влияния бактерий *B.subtilis*, *S.pasteurii* и *S.ureae* на прочностные характеристики цементных систем в зависимости от концентрации бактерий и возраста образцов [8]. Предложен способ, предполагающий их совместное использование с защитными минеральными компонентами в виде пемзы или цеолита, при этом рост прочности на сжатие достигает 20 %. По эффективности использования их расположили в ряд (в порядке убывания): *B.subtilis*, *S.pasteurii*, *S.ureae* [8, 9].

Разработан состав биодобавки [10] для бетонной смеси, содержащей микроорганизм вида *Leuconostoc mesenteroides* и микрокремнезем. По данным авторов, ее введение обеспечивает 20%-й рост прочности при 2-кратном повышении подвижности бетонной смеси.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. При обосновании выбора вида биодобавки в цементные системы учитывали, что штаммы *Bac. cereus* хорошо развиваются в слабощелочной среде. Ретроспективный анализ исследований показал, что начало работ по практическому использованию биогенного карбоната кальция на основе бактериальных штаммов (*Bacillus cereus*) датируется восьмидесятыми годами XX века [11]. Суть технологических решений заключается в создании защитного кальциевого слоя за счет метаболизма бактерий, обусловленного азотным циклом. Впоследствии для реставрации памятников фирмой Amonit (Франция) был разработан промышленный продукт *Biominéralisant Calcite*. Запатентованный метод французских ученых заключается в нанесении преактивированного продукта на каменную поверхность с ее последующим периодическим опрыскиванием нутриционным веществом, стимулирующим процесс синтеза биогенного карбоната кальция (рис. 1).



Рис. 1. Схема механизма биоцементации

При проведении исследований применяли:

– биодобавку на основе экзометаболитов микроорганизма штамма *Bacillus cereus* со следующими характеристиками: плотность – $0,994 \text{ г/см}^3$, поверхностное натяжение 0,5%-го водного раствора – 68 мН/м; pH=7,5;

растворных смесей при неизменном значении водоцементного отношения ($B/C=const$). Результаты экспериментов первой серии приведены в табл. 3.

Во второй серии величину B/C определяли, исходя из условия равноподвижности смесей. При этом было установлено, что введение биодобавки позволяет снизить величину B/C на 6,25 %. Однако, как показали последующие испытания, это не сопровождается увеличением прочности.

Т а б л и ц а 3

Результаты определения подвижности цементного раствора

Показатели	Состав		
	1	2	3
Расход портландцемента, г	500	500	500
Расход песка, г	1500	1500	1500
Расход воды, мл	300	300	300
Содержание добавки, %	0	1,25	2,5
Водоцементное отношение	0,60		
Расплыв конуса, мм	106	112	115

Анализ данных указывает на наличие слабого пластифицирующего эффекта от введения биологической добавки (~8,5 %). Таким образом, задача существенного увеличения прочности цементного камня за счет снижения водоцементного отношения является трудноразрешимой.

Результаты механических испытаний образцов из исследуемых составов приведены на рис. 2...3.

Из полученных результатов следует, что введение биодобавки:

- при ее содержании до 5% сопровождается незначительным увеличением подвижности цементного раствора (8,0...8,5%);

- приводит к росту прочности на изгиб: на ранних сроках – до 9%, а в возрасте образцов 28 суток – до 22 %. При этом увеличение содержания добавки с 1,25 до 5,0 % коррелирует с повышением прочности образцов;

- вызывает максимальное увеличение прочности на сжатие (до 21 %) только на ранних этапах твердения (до 3-х суток), при продолжении твердения данный показатель снижается до значений 7... 11%.

Исходя из результатов, биодобавка обладает способностью ускорять твердение цементных систем, особенно при ее дозировках до 5% от общей массы воды затворения.

Влияние содержания добавки на подвижность раствора ограничено: при увеличении до 2,5 % подвижность возрастает на 8,5 %, при дальнейшем увеличении (5...10 %) подвижность раствора снижается в сравнении с контрольным составом.

Неординарный характер влияния биодобавок на прочность цементных систем иллюстрируют следующие данные: при изгибе приращение величины прочности существенно больше (22 %), чем при сжатии (11%). Причины этого расхождения могут обуславливаться в том числе геометрией новообразований (например, филаменты на рис. 1).

В третьей серии экспериментов исследовали влияние повышенных концентраций добавки (5 и 10 %) на подвижность раствора и его прочность после затвердевания (табл. 4, рис. 4 и 5).

Т а б л и ц а 4

Влияние повышенных концентраций биодобавки на вязкость цементного теста

Показатели	Состав				
	1	2	3	4	5
Расход портландцемента, г	500	500	500	500	500
Расход песка, г	1500	1500	1500	1500	1500
Расход воды (с биодобавкой), г	280	280	280	280	280
Процентное содержание биодобавки в воде, %	0	1,25	2,5	5	10
B/C	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Расплыв конуса, мм	106	108	108	106	104

Результаты испытаний образцов (составы №1...№5 в табл. 4) приведены на рис. 4 и 5.

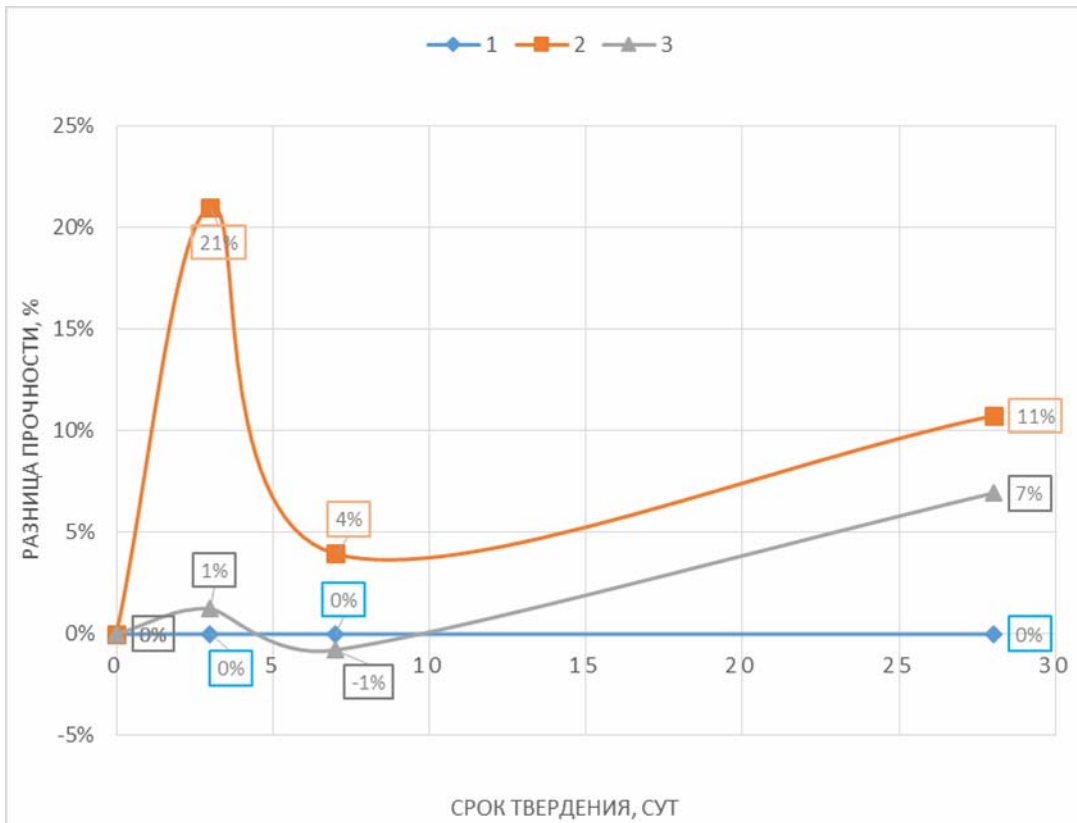
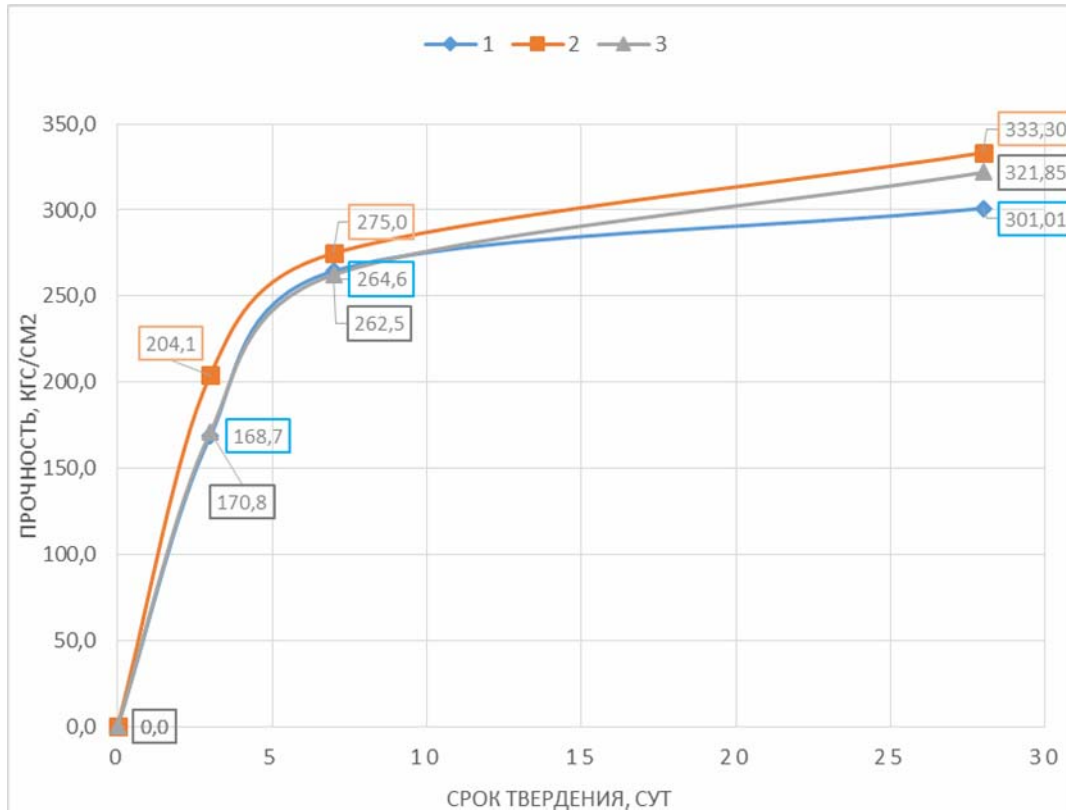


Рис. 2. Абсолютные значения и сравнительная оценка прочности образцов на сжатие

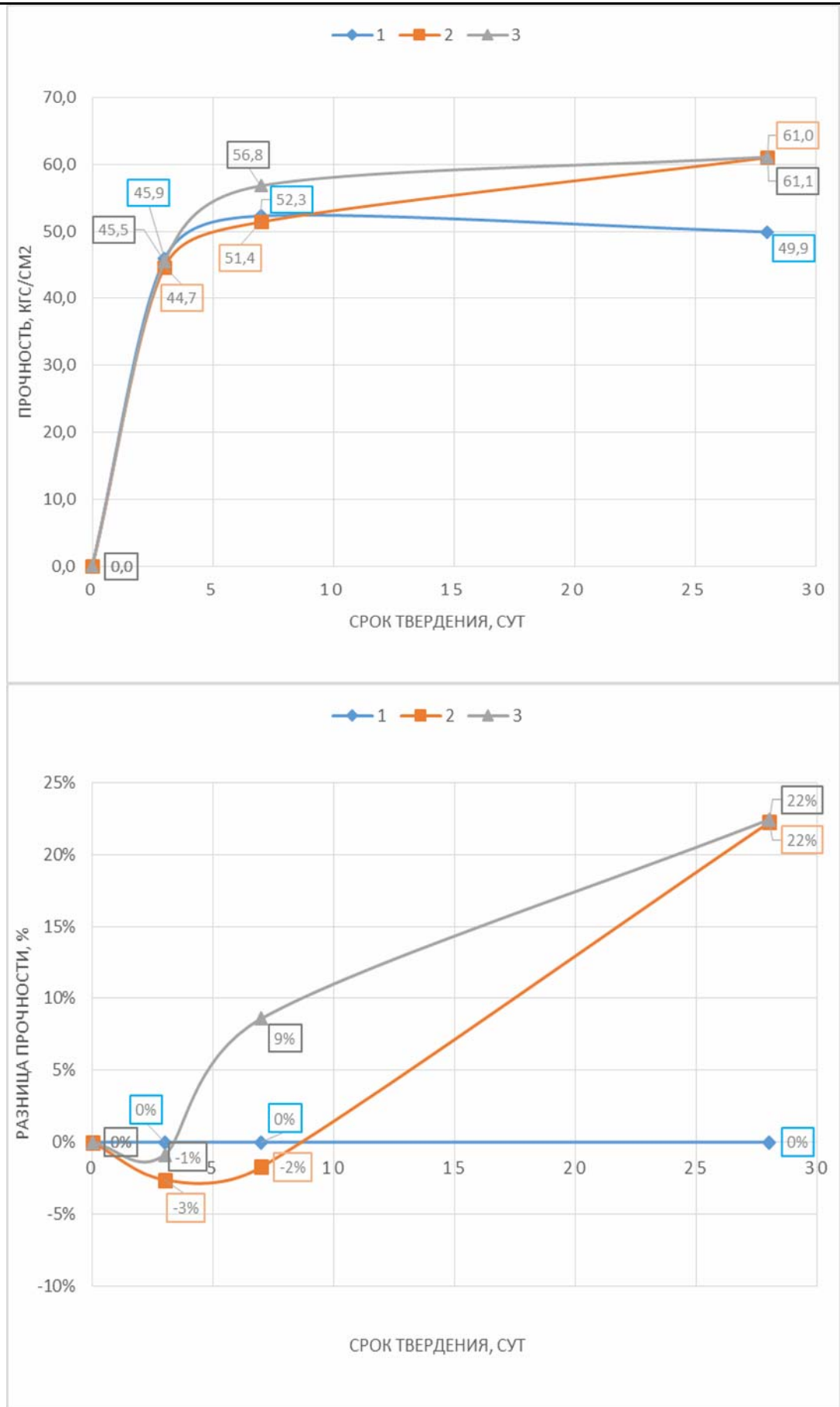


Рис. 3. Абсолютные значения и сравнительная оценка прочности образцов на изгиб

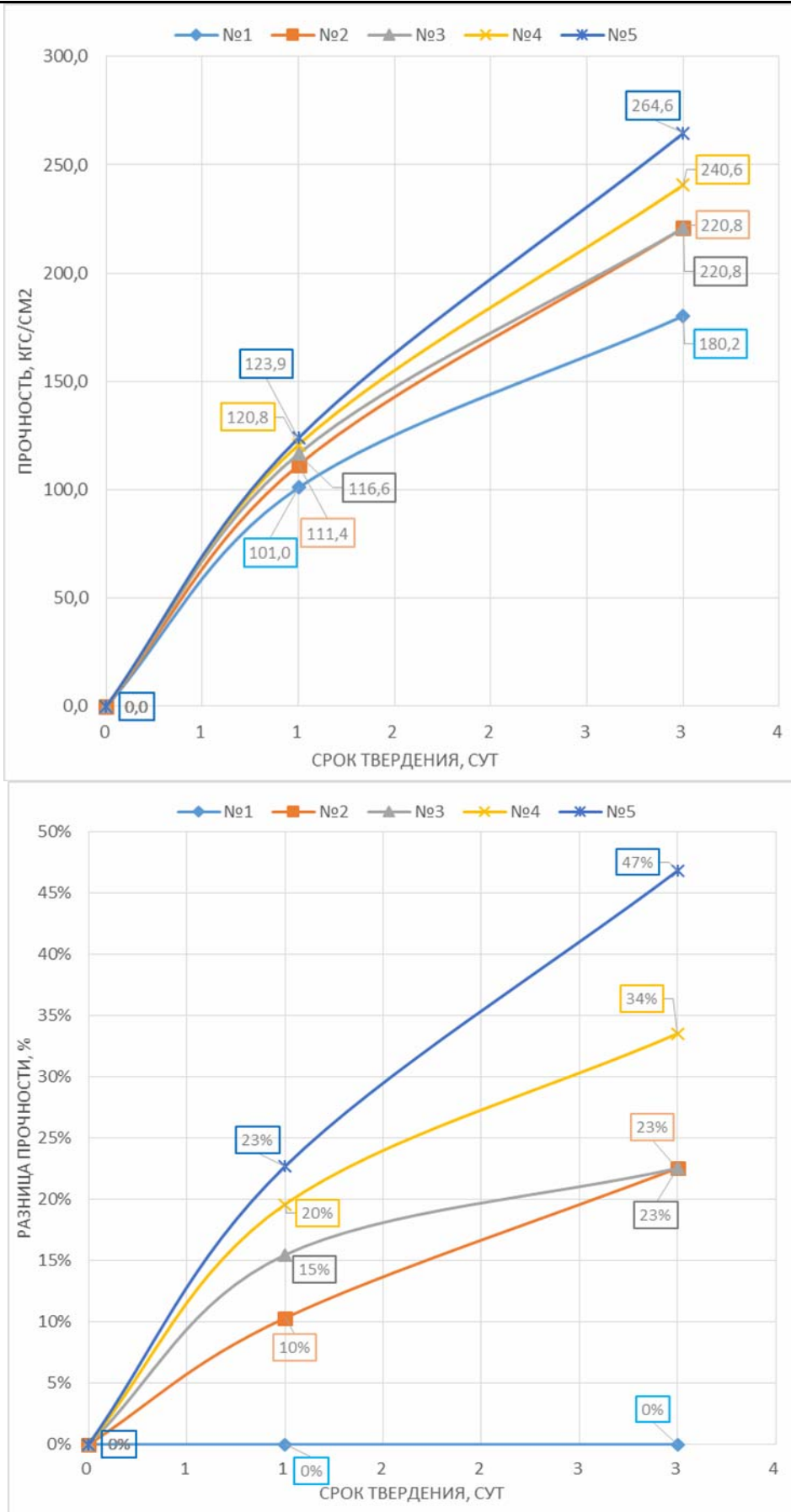


Рис. 4. Абсолютные значения и сравнительная оценка прочности образцов на сжатие

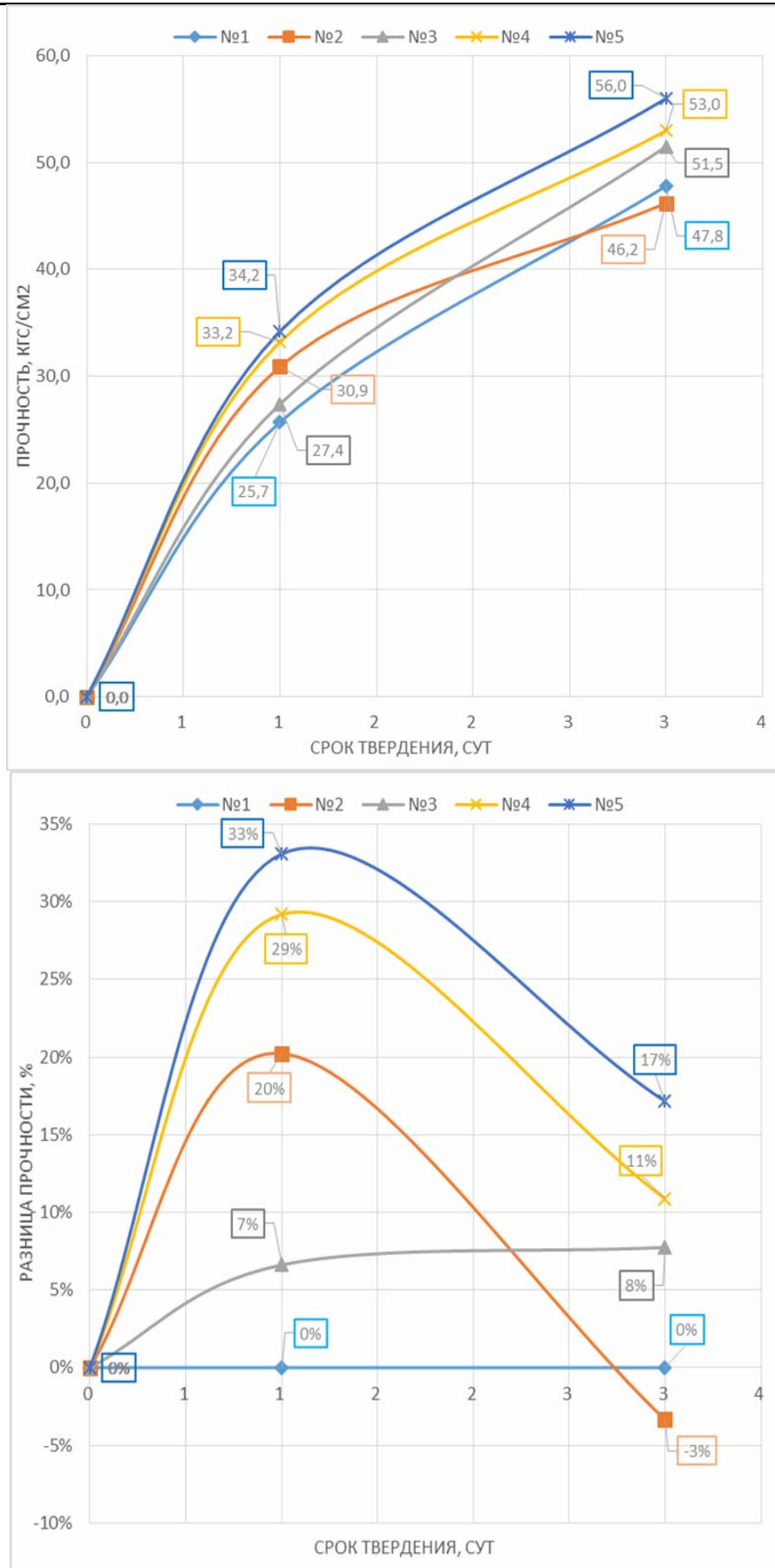


Рис. 5. Абсолютные значения и сравнительная оценка прочности образцов на изгиб

Увеличение содержания добавки до 10 % (что превышает оптимум ее содержания по показателю пластифицирования) сопровождается значимым ростом прочностных показателей цементного раствора на сжатие: через 24 часа твердения (23%), через 72 часа (47 %). Рост показателя прочности на изгиб образцов аналогичных составов в равные сроки твердения составляет 33 и 17 %.

Для обоснования механизма биоцементации был поставлен эксперимент на модельной системе следующего состава: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (известковое тесто):песок=1:2 (по массе). В модифицированный состав дополнительно вводили 10% биодобавки. Установлено, что после твердения в течение 72 часов в воздушно-сухих условиях рост прочности по сравнению с контрольным составил от 80 до 92%. Это является косвенным подтверждением того, что существенная составляющая формирования прочности твердеющих цементных систем обусловлена образованием биокальцита как результата взаимодействия известки, выделяющейся на начальном этапе гидратации алитовой составляющей клинкера портландцемента, и продуктов метаболизма бактерий.

Выводы. В результате исследования влияния добавок экзометаболитов микроорганизма штамма *Bacillus cereus* на цементные системы установлено существенное (до 45...47 %) увеличение прочности на сжатие модифицированных составов после 72 часов твердения в нормальных условиях.

Максимальная пластификация цементных растворов при введении биодобавки ограничена 8,5 % и наблюдается при ее содержании до 2,5 %.

Позитивный эффект от применения биодобавки позволяет обосновать целесообразность продолжения исследований с целью развития технологий биоцементации искусственных минеральных конгломератов.

Список литературы

1. Muynck, W. De. Microbial carbonate precipitation in construction materials/ W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete // *A review Ecol. Eng.* – 2010. – №36 (2). – P. 118–136.
2. Ghosh, S.K. Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications / S.K. Ghosh. – Wiley WCH: Weinheim, 2009. – P. 218.
3. Максимович, Н.Г. Биотехнологии в инженерной геологии/ Н.Г. Максимович В.Т. Хмурчик // *Инженерная геология.* – 2014. – №3. – С.18–25.
4. Rafat, S. The influence of ureolytic bacteria on the properties of concrete/ S. Rafat, Kaur S. Navnet // *Construction and building materials.* – 2011. – № 10. – P. 3791–3801.
5. Jonkers, H.M. The use of bacteria as a self-healing agent for the development of sustainable concrete/ H.M.Jonkers, A.Teissen, G.Muizer, O.Kopuroglu and E. Schlangen // *Environmental Engineering.* – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 230–235.
6. Иванова, А.Б. Ионы кальция в регуляции некоторых метаболических процессов растительной клетки / А.Б. Иванова, О.О.Польгалова, Л.Х. Гордон // *Цитология.* – 1997. – Т. 39, № 4–5. – С. 352–360.
7. Morgan, L. Calcium and plant disorders in hydroponics/ L. Morgan // *Hydroponics and greenhouses.* – 1998. – Vol. 38. – P. 61–71.
8. Ерофеев, В.Т. Исследование изменений прочностных характеристик цементных композитов в зависимости от концентрации в них бактерий и возраста образцов / В.Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман // *Приволжский научный журнал.* – 2018. – № 3. – С.70–76.
9. Ерофеев, В.Т. Интеллектуальные композиты и их использование для получения самовосстанавливающихся бетонов / В.Т.Ерофеев, В.М.Круглов, Н.И.Ватин, Аль Дулайми Салман Давуд Салман // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения».* – 2019. – №4. – DOI: 10.15862/12SATS419.
10. Пат. 2488564 РФ С1 МПК C04B 28/00. Биодобавка для бетонной смеси / Дудынов С.В., Черкасов В.Д., Бузулуков В.И. – 2011152732/03, заявл. 22.12.2011; опубл. 27.07.2013; бюл. № 21.

11. Паола Лоренци. Новые технологии в обработке и сохранении камня памятников истории и культуры // Международная научно-практическая конференция: Наследие, наука и технологии, 2017. – АУИПИК, СПбГУ – URL: <http://auiplik.ru/wp-content/uploads/2017/12/Паола-Лоренци-Paola-Lorenzi-.pdf>.

12. Гамалий, Е.А. Структура и свойства цементного камня с добавками микрокремнезема и поликарбоксилатного пластификатора / Е.А.Гамалий, Б.Я.Трофимов, Л.Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ. – 2009. – № 16. – С. 29–35.

References

1. Muynck, W. De. Microbial carbonate precipitation in construction materials/ W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete // A review Ecol. Eng. – 2010. – №36 (2). – P. 118–136.

2. Ghosh, S.K. Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications / S.K. Ghosh. – Wiley WCH: Weinheim, 2009. – P. 218.

3. Максимович, Н.Г. Биотехнологии в инженерной геологии/ Н.Г. Максимович В.Т. Хмурчик // Инженерная геология. – 2014. – №3. – С.18–25.

4. Rafat, S. The influence of ureolytic bacteria on the properties of concrete/ S. Rafat, Kaur S. Navnet // Construction and building materials. – 2011. – № 10. – P. 3791–3801.

5. Jonkers, H.M. The use of bacteria as a self-healing agent for the development of sustainable concrete/ H.M.Jonkers, A.Teissen, G.Muizer, O.Kopuroglu and E. Schlangen // Environmental Engineering. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 230–235.

6. Ivanova, A.B. Calcium ions in the regulation of certain metabolic processes of a plant cell / A.B. Ivanova, O.O.Polygalova, L.Kh. Gordon // Cytology. – 1997. – Vol. 39, N. 4-5. – P. 352–360.

7. Morgan, L. Calcium and plant disorders in hydroponics/ L. Morgan // Hydroponics and greenhouses. – 1998. – Vol. 38. – P. 61–71.

8. Erofeev, V. T. Investigation of changes in the strength characteristics of cement composites depending on the concentration of bacteria in them and the age of samples / V.T. Erofeev, Al Dulaimi Salman Davud Salman // Privolzhsky scientific journal. – 2018. – N. 3. – P. 70–76.

9. Erofeev, V.T. Intelligent composites and their use for self-healing concrete / V.T.Erofeev, V.M.Kruglov, N.I.Vatin, Al-Dulaimi Salman Dawood Salman // Russian journal of transport engineering. – 2019. – № 4(6). – URL:<https://ts.today/PDF/12SATS419.pdf>.

10. Pat. 2488564 RU C1 MPC C04B 28/00. Bioavailability for concrete mix / Dudynov S.V., Cherkasov V.D., Buzulukov V.I. – 2011152732/03, decl.22.12.2011; publ. 27.07.2013; bul. №. 21.

11. Paola Lorenzi. New technologies in processing and preserving stone monuments of history and culture // International scientific and practical conference: Heritage, science and technology. – 2017. – АУИПИК, Saint Petersburg state University – URL: <http://auiplik.ru/wp-content/uploads/2017/12/Paola-Lorenzi-Paola-Lorenzi.pdf>.

12. Gamaliy, E.A. Structure and properties of cement stone with additives of microsilicon and polycarboxylate plasticizer / E. A.Gamaliy, B. Ya.Trofimov, L. Ya. Kramar // Bulletin of SUSU. – 2009. – № 16. – P. 29–35.

УДК 691:519.7

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.

Budylna 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

ИЗ ОПЫТА СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Определяются методологические принципы разработки композиционных материалов как сложных систем с использованием методов системного анализа, теорий идентификации и управления. Анализируются состояние и перспективы развития теоретических и практических методов идентификации. В качестве иллюстрации рассматриваются результаты комплексных исследований по разработке композитов с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: композиционные материалы, сложные системы, системное проектирование, идентификация, синтез, управление

FROM EXPERIENCE OF SYSTEM DESIGN OF COMPOSITE MATERIALS

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

The methodological principles of the development of composite materials as complex systems using the methods of system analysis, identification and management theories are determined. The state and prospects of development theoretical and practical methods of identification are analyzed. As an illustration, the results of comprehensive research on the development of composites with a given set of operational properties are considered.

Keywords: composite materials, complex systems, system design, identification, synthesis, management

Принцип системности дает возможность представить исследуемый объект в виде некоторой системы, которая характеризуется элементным составом, структурой, межэлементными связями, функциями элементов и целого, единством внутренней и внешней среды системы [1...6]. Система определяется совокупностью системооб-

разующих факторов (ими определяется познавательный эффект). Нередко за системообразующий фактор принимается цель.

Особое место в изучении реальной действительности занимает моделирование процессов и явлений. Наибольшими возможностями обладает математическое моделирование, позволяющее исследовать процессы, имеющие различное физическое содержание, но описываемые одинаковыми математическими соотношениями. Ни один из методов идентификации не годится для идентификации всех видов систем. Каждый из них имеет свою область/области применения. Это, однако, не означает, что на современном уровне идентификация должна рассматриваться как набор готовых рецептов для различных типов систем. Сейчас уже можно говорить о теории идентификации, имеющей дело с оцениванием параметров на основании измеренных текущих входных и выходных данных. Ошибки идентификации, естественно, приводят к ошибкам в управлении или в требуемом выходном параметре системы (ошибки могут быть использованы для дальнейшего уточнения параметров идентификации). Сложность и многообразие процессов функционирования реальных систем не позволяют получить абсолютно адекватные математические модели. Математическая модель, описывающая формализованный процесс функционирования системы, в состоянии охватить только основные, характерные закономерности. Надо помнить, что нет возможностей указать формальные правила для выбора характеристик состояний и параметров исследуемых реальных систем. Исследователь вынужден руководствоваться лишь собственной интуицией, опирающейся на постановку прикладной задачи и понимание природы процессов функционирования системы.

Здесь подразумевается, что если задача сформулирована на математическом языке, то она полностью переходит в сферу математики, разработанной и строго обоснованной наукой, так что за дальнейшую судьбу задачи волноваться не нужно, если только она не окажется непомерно трудной. При решении многих вопросов помогает известный принцип (закон) 100%-й эффективности математики.

Нет никакого сомнения, что процесс математизации, развитие и применение математических моделей и математического аппарата в ближайшие годы будут усиливаться. Этим объясняется и возросший интерес к тому, как именно осуществляется процесс применения математики: как создаются математические модели, как они изучаются, как интерпретируются и т.д. Здесь речь идет не о многочисленных конкретных случаях применения математики, а об изучении общих законов этого применения.

Для иллюстрации рассмотрим задачу определения условий флокуляции и седиментации [7] в дисперсных системах (представлялась как система частиц, движущихся под действием гравитационных сил, сил парного взаимодействия, взаимодействия с границами и дисперсионной средой) методами молекулярной динамики.

Эволюция описывалась системой уравнений:

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}_i - k_i (\dot{\mathbf{r}}_i - \mathbf{v}_i) = -\nabla U_i, \quad i = \overline{1, N}; \quad (1)$$

где m_i – масса i -й частицы; $\mathbf{r}_i = (x_i; y_i; z_i)$; k характеризует диссипативные свойства дисперсионной среды; \mathbf{v}_i – скорость дисперсионной среды в точке \mathbf{r}_i , U_i – потенциал в точке \mathbf{r}_i .

В (1) левая часть неизменна по форме для любой дисперсной системы. В правой части вид потенциала определяется характером межфазного взаимодействия.

Для лиофобных систем потенциал парного взаимодействия описывает силы притяжения, действующие на расстояниях, больших некоторого предельного; он обычно представляется в виде

$$U_p(r_{ij}) = U_0 \left(\left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right)^6 \right), \quad (2)$$

где r_{ij} – расстояние между поверхностями частиц; U_0 – характерная энергия; r_0 – расстояние, соответствующее положению равновесия (в пределах $10^{-9} \dots 10^{-7}$ м).

Для лиофильных систем (если рассматривается только установившаяся конфигурация) можно принять

$$U_p(r_{ij}) = \frac{k}{|r_{ij}|}, \quad (3)$$

k – постоянная.

При моделировании систем с сольватными слоями потенциал парного взаимодействия можно принять в виде

$$U_p(r_{ij}) = U_0 \left(\left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right)^6 + e^{-(r_{ij}-r_0)^2} \right). \quad (4)$$

Полагая $\mathbf{v}_i = \dot{\mathbf{r}}_i$, (1) можно представить в виде

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i = \frac{1}{m_i} (k(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i,e}) - \nabla U_i), \quad i = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (5)$$

$\mathbf{v}_{i,e}$ – скорость дисперсионной среды в точке \mathbf{r}_i ; N – число частиц.

Чтобы не применять разностное дифференцирование, уместнее использовать не потенциал, а модуль силы парного взаимодействия, вязкого трения и силы взаимодействия с границей области. Учет конечности размеров частиц осуществлялся корректировкой аргументов в выражениях для модулей сил:

$$\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji} = \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} F_{ij} (r_{ij} - R_i - R_j), \quad i = \overline{1, N-1}, \quad j = \overline{i+1, N},$$

$$\mathbf{F}_{i,b} = \frac{\mathbf{n}_{i,b}}{n_{i,b}} F_{i,b} (n_{i,b} - R_i), \quad i = \overline{1, N},$$

\mathbf{F}_{ij} – сила парного взаимодействия; $\mathbf{F}_{i,b}$ – сила взаимодействия с границей; \mathbf{r}_{ij} – вектор, соединяющий центры частиц; \mathbf{n}_i – вектор, соединяющий центр частицы с ближайшей точкой граничной поверхности; N, R_i, R_j – число и радиусы частиц.

В этом случае (5) представится в виде

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{g} + \frac{1}{m_i} \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \mathbf{F}_{ij} + \mathbf{F}_{i,b} + \mathbf{F}_{i,e} \right), \end{cases}$$

и задача моделирования сведется к задаче Коши.

Видим, анализ каждой сложной системы уникален и требует междисциплинарных исследований с использованием системного подхода. При этом «..часто не работает метод декомпозиции системы на ее отдельные части и исследования ее как более простых, а далее синтеза системы из ее отдельных более простых частей. На самом деле, надо оценивать и анализировать как целостную или единую, и нельзя осуществить анализ и оценку системы после ее декомпозиции на более простые части» (И.В. Прангишвили).

В связи с размытостью представлений об идентификации как об особом типе человеческой деятельности идентификационный подход еще окончательно не оформился. Процесс познания действительности при создании реальных систем не всегда можно научно объяснить. Пока в нём доминирует математический уровень строгости, математический язык рассматривается как наилучшее средство представления

системы. В большинстве работ ограничиваются лишь постановкой и исследованием математических задач и не затрагиваются содержательные и человеческие аспекты практической идентификации. Подобная избирательность во многом определяется тем, что при значительном объеме представлений о потенциально возможных способах исследования не в состоянии разработать детальную общую схему идентификации, ориентированную на использование определенной системы научных понятий, достаточных с точки зрения большинства исследователей для обоснования. На сегодня понятия, отражающие роль человека при определении целей идентификации, теоретически не сформулированы.

Задачу идентификации характеристик системы можно рассматривать как дуальную (сопряженную) по отношению к задаче управления системой. Нельзя управлять системой, если она не идентифицирована или заранее, или в процессе управления. При отсутствии априорных знаний возникает необходимость измерения реакции системы на ряд входных воздействий; по существу, производится идентификация. Естественно, знание результатов идентификации до начала процесса управления существенно влияет на его реализацию.

Определение структуры системы и ее параметров на основе анализа ее входных и выходных данных рассматривается как инструмент проверки гипотез о соответствии структуры и/или параметров системы и модели на основе экспериментальных данных о ее функционировании. Структурная идентификация состоит в определении вида математической модели системы (общая задача идентификации). После того как математическая модель системы определена, проводят параметрическую идентификацию (частная задача идентификации), заключающуюся в определении числовых параметров математической модели, при которых решение задачи соответствовало бы экспериментальным данным (найденные значения констант не должны противоречить физическому смыслу и теоретическим соображениям). Роль структуры модели трудно переоценить, неудачный выбор ее сводит на нет и все результаты параметрической идентификации.

Модели могут быть в разной степени формализованными, но все они обладают тем главным свойством, что связывают наблюдения в некоторую общую картину. Решение задачи построения математических моделей динамических систем по данным наблюдений за их поведением составляет предмет теории идентификации, которая тем самым становится элементом общей научной методологии.

В динамической системе происходят взаимодействия между ее разнотипными частями, и формируются наблюдаемые (выходные) сигналы. Все остальные сигналы рассматриваются как возмущения (входные сигналы; измеряемые и неизменяемые шумы). Совокупность предполагаемых связей между наблюдаемыми сигналами и является моделью в широком смысле. Модель может принимать разные форму и степень математической детализации (или вообще без использования языка математики). В большинстве случаев соотношения, описывающие взаимодействие различных составляющих динамической системы, задаются в виде систем алгебраических, дифференциальных, разностных, алгебро-дифференциальных или интегральных уравнений. Такие модели являются математическими (непрерывные и дискретные по времени, сосредоточенные и распределенные, детерминированные или стохастические, линейные или нелинейные и др. в зависимости от типа используемых уравнений).

Численные характеристики изучаемой системы могут быть константами или переменными. Часть из них может быть измерена лабораторными методами в ходе эксперимента, а другая либо вообще не может быть измерена современными методами, либо их измерение чрезвычайно трудоемко и дорого (неизменяемые константы и переменные).

Выбор метода идентификации определяется неоднозначно, ибо в самой постановке задачи заранее предполагается неопределенность (неполнота знаний об объекте, ограничения в наблюдениях объекта во времени, неточность измерения сигналов на входе и на выходе объекта и т. п.). При любом методе идентификации очень важным является знание размерности вектора состояния и природы внутренних связей или

нелинейностей. Существенным является число входных воздействий (системы с одним или несколькими входами); методы идентификации значительно проще при одном входном воздействии.

Сделаем важные замечания.

Прежде всего, всегда необходима оценка влияния ошибок идентификации на качество управления системой по результатам идентификации (задача идентификации, как обратная, относится к классу некорректных задач).

Во-вторых, идентификация динамических параметров на основании измерений возможна только в случае, когда измерения выполнены в период переходного состояния системы; никакими методами невозможно идентифицировать динамические параметры системы, находящейся в установившемся режиме.

Наконец, при идентификации параметров нелинейных систем последние должны принадлежать к заранее заданному виду: параметр, наилучшим образом описывающий систему при одной форме представления, может оказаться совершенно неудовлетворительным при другом описании системы.

Создание адекватной модели возможно лишь в случае, когда свойства и взаимосвязи моделируемого объекта в достаточной степени изучены. Налицо парадокс: если объект изучен, зачем его моделировать; а если объект не изучен, то как можно построить адекватную модель. Традиционно этот парадокс разрешается тем, что модель не обосновывается, а постулируется на основе эмпирических сведений, которыми располагает исследователь.

Адекватность системной модели объекту изучения нельзя доказать: модель может быть принята либо отвергнута на том основании, что получаемые с ее помощью оценки и выводы противоречат наблюдаемым фактам. Системная модель всегда будет отличаться от оригинала; можно говорить об асимптотическом приближении к нему при выполнении определенных условий для каждой практической задачи. Асимптотическая сходимость обеспечивается тем, что объектом моделирования является конкретная система с присущими только ей автономными законами функционирования (свойственны и присущи только данной системе). Отметим, адекватность достигается сужением сферы использования данной системной модели, ограниченностью ее практической применимости. Адекватность повышается за счет модельных экспериментов: появляются новые знания интуитивного характера, которые могут использоваться для настройки свойств модели с учетом свойств изучаемого объекта. Процесс моделирования позволяет глубже проникнуть в существо объекта-оригинала, а модельные исследования приводят к открытию новых свойств и закономерностей функционирования изучаемой системы.

На сегодня пока нет единой теории построения системных моделей, в полной мере реализующей концепцию системного гомеостазиса. Системные модельные исследования итеративны: любая системная проблема решается на основе последовательного приближения и не имеет окончательного решения. Это согласуется с одним из основных принципов системного подхода: при сколь угодно глубоком познании невозможно получить исчерпывающую характеристику изучаемого объекта. Задача состоит в том, насколько качественно данный уровень познания позволяет разрешить поставленную проблему. Для оценки эффективности и надежности модели используются количественные критерии. На основе качественных критериев модель оценивается с точки зрения ее понятности, простоты использования, тестируемости, возможности развития, а также применения в других проблемных областях. Критерий является количественным, когда его значения имеет смысл сравнивать: насколько или во сколько раз одно значение больше другого. В случае качественного критерия такие сравнения бессмысленны. Промежуточное положение между количественными и качественными критериями занимают критерии с балльными шкалами. Утверждение о значениях критериев с заданными типами шкал будет адекватным, если его истинность сохраняется после любых допустимых преобразований, определяемых типами шкал. Так что при анализе и решении многокритериальной задачи оптимизации необходимо применять только те определения и понятия, методы и процедуры, которые приводят к получению адекватных выводов и рекомендаций.

Системные исследования являются симбиозом теоретических модельных экспериментов с наблюдениями, эмпирическими исследованиями, натурными (лабораторными) экспериментами. Ведущая роль моделирования состоит в том, что модель должна предшествовать натурным экспериментам и указывать направления сбора информации в процессе наблюдений. В то же время результаты модельных исследований нуждаются в фактических исходных данных и требуют экспериментального подтверждения.

В качестве иллюстрации можно рассматривать результаты системных исследований (математическое моделирование, вычислительный эксперимент, разработка методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза и идентификации) при разработке композитов с заданным комплексом эксплуатационных свойств [8...15]. Проектирование композиционного материала (системы) сводится к построению его сложной модели (объединяет частные, взаимосвязанные, взаимообусловленные модели; см. рисунок).



Блок-схема системного проектирования композита

Отсутствие абсолютной уверенности в прогнозировании функционирования материала приводит к необходимости предусмотреть и возможность различных его модификаций.

Таким образом, системный подход позволяет обойти многие сложности при формализованном описании системы (работа исследователя) с учетом многообразия проявления свойств, неопределенностей состояний системы (свойства реальной системы).

Список литературы

1. Garkina, I. Mathematical methods of system analysis in construction materials / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 245.
2. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – С. 2524–2527.
3. Бudyлина, Е.А. Моделирование с позиций управления в технических системах / Е.А. Бudyлина, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2. – С. 138–142.
4. Гарькина, И.А. Управление в сложных технических системах: методологические принципы проектирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С.39–42.
5. Данилов, А.М. Математическое моделирование сложных систем: состояние, перспективы, пример реализации / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 333–337.
6. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 119–123.
7. Гарькина, И.А. Флокуляция в дисперсных системах / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.А. Смирнов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 2.3 (32). – С. 344–346.
8. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 1 (625). – С. 80–85.
9. 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.
10. Garkina, I. Modeling of kinetic processes in composite materials / I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P.421–425.
11. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P.95.
12. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
13. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
14. 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.
15. Данилов, А.М. Приближенные методы аналитического конструирования композиционных материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 24–29.

References

1. Garkina, I. Mathematical methods of system analysis in construction materials / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 245.
2. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – C. 2524–2527.
3. Budylna, E.A. Modeling from the position of control in technical systems / E.A. Budylna, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2013. – № 2. – P. 138–142.
4. Garkina, I.A. Management in complex technical systems: methodological design principles / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 1. – P.39–42.
5. Danilov, A.M. Mathematical modeling of complex systems: state, prospects, implementation example / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Bulletin of civil engineers. – 2012. – № 2 (31). – P. 333–337.
6. Garkina, I.A. Unified system design concept for complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 1 (38). – P. 119–123.
7. Garkina, I.A. Flocculation in dispersed systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.A. Smirnov // Control systems and information technologies. – 2009. – № 2.3 (32). – P. 344–346.
8. Danilov, A.M. Methodology for the design of complex systems in the development of special-purpose materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // News of higher educational institutions. Building. – 2011. – № 1 (625). – P. 80–85.
9. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Bulletin of higher education. Building. – 2013. – №8 (656). – P. 28–33.
10. Garkina, I. Modeling of kinetic processes in composite materials / I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P.421–425.
11. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P.95.
12. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
13. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
14. 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.
15. Danilov, A.M. Approximate methods of analytical design of composite materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2019. – №1 (38). – P. 24–29.

УДК 691.327:539.32

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

Макридин Николай Иванович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Максимова Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: maksimovain@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

Makridin Nikolai Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Technology of Building Materials
and Woodworking»

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Quality Management and
Construction Technologies»
E-mail: maksimovain@mail.ru

О ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОМ И ТЕХНИЧЕСКОМ ВЛИЯНИИ ДОБАВОК МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Приведены экспериментальные данные по изучению удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости гидросиликатов кальция, полученных в присутствии модифицирующих химических добавок разной природы. Высказаны теоретические воззрения о влиянии химических добавок на разрыхление связи SiO кремнекислородного тетраэдрического мотива и разную степень упорядоченности состояния H₂O в структуре гидросиликатов кальция, приводящих к изменению их электрофизических свойств и влиянию на химические процессы структурообразования и твердения дисперсно-кристаллитной структуры цементных систем.

Ключевые слова: гидросиликаты кальция, химические добавки, структурообразование, дисперсно-кристаллитная структура, твердение, удельная электропроводность, диэлектрическая проницаемость, прочность цементной системы

ABOUT PHYSICAL-CHEMICAL AND TECHNICAL INFLUENCE OF ADDITIVES OF MODIFIED CALCIUM HYDRO SILICATES ON THE PROCESSES OF STRUCTURAL FORMATION AND CURING OF CEMENT STONE

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

The paper presents experimental data on the conductivity and permittivity of calcium hydro silicates obtained in the presence of modifying chemical additives of different nature. Theoretical views are expressed on the effect of chemical additives on the loosening of the SiO bond of the silicon-oxygen tetrahedral motif and the different degree of ordering of the H₂O state in the structure of calcium hydro silicates, which lead to a change in their electro physical properties and the influence on the chemical processes of structure formation and hardening of the dispersed-crystalline structure of cement systems.

Keywords: calcium hydro silicates, chemical additives, structure formation, dispersed crystallite structure, hardening, electrical conductivity, dielectric constant, strength of the cement system

В современном бетоноведении в области изучения влияния химических добавок к бетонам преобладают технологическое и строительно-техническое направления [1–6]. Сведений же, касающихся химических свойств и механизма действия добавок, то есть физико-химического подхода, основанного на знаниях механизма действия добавок на элементарные стадии гидратации (смачивания, адсорбции, растворения, диффузии, собственно химической реакции зародышеобразования и образования гидратов), осложненной для полиминеральных вяжущих практическими условиями протекания процессов за счет взаимного влияния минералов друг на друга и оказывающей непосредственное влияние на формирование фазового состава и дисперсно-кристаллитной структуры цементной системы с определенными физико-механическими свойствами, гораздо меньше, и они пока не могут служить научной основой прогнозирования и управления свойствами цементных композитов с помощью этих добавок, что вызывает необходимость более глубокого понимания физических и химических аспектов регулирования и синтеза дисперсно-кристаллитной структуры гидросиликатов кальция (ГСК) и конструкционной прочности цементного камня.

Как известно, ГСК по объему и значению являются основным продуктом цементирующего вяжущего вещества и основным носителем механической прочности цементного камня. Основываясь на современных представлениях физико-химии поверхностных явлений и теории контактных взаимодействий, следует отметить, что главную роль в такой системе с учетом низкой растворимости кремнезема играют адсорбционные процессы, протекающие на поверхности частиц кремнезема. Поэтому, оказывая влияние на адсорбционные процессы с помощью добавок различной химической природы, можно изменять фазовый состав, микроструктуру и свойства ГСК. В связи с этим представляет как теоретический, так и практический интерес влияние синтетических модифицированных ГСК в виде наногидросиликатов кальция как затравок нуклеации (зародышеобразования) и кристаллизации на процессы гидратации и твердения дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня.

Наше исследование посвящено, во-первых, получению ГСК, модифицированных химическими добавками разного типа, с оценкой их электрофизических свойств и расчетных значений плотности дислокаций в структуре ГСК, которые позволяют полнее познать их физико-химическую природу, тип химической связи, влияние примесей на структуру кристаллической решетки ГСК, а во-вторых, – изготовлению опытных образцов цементного камня с использованием полученных модифицированных ГСК в качестве затравок структурообразования и твердения образцов цементного камня сравниваемых серий.

ГСК были получены нами в модельной системе $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ при водотвёрдом отношении, равном 60. Методика получения ГСК в порошкообразном состоянии изложена нами в работе [7].

Результаты опытов [8–10] показали, что наиболее чувствительной к изменению состава, структуры, природы и концентрации дефектов является удельная электропроводность ГСК, численные значения которой могут быть использованы в качестве прогностической характеристики химической добавки, влияющей на качество структурообразования и твердения цементного камня и его конструкционную прочность.

В табл. 1 представлены значения удельной электропроводности ГСК, полученных в присутствии различных добавок.

Из табл. 1 видно, что удельная электропроводность ГСК, полученных в присутствии анионоактивного вещества тетрадецилсульфата натрия ($\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{OSO}_3\text{Na}$), при концентрации его, равной 250 мг/л, увеличивается втрое. В присутствии катионоактивного вещества Алкамон ОС-2 удельная электропроводность ГСК также увеличивается, но в меньшей степени. В присутствии анионоактивного вещества Прогресс, содержащего примесь сульфата натрия, а также апротонных кислот, удельная электропроводность ГСК меньше, чем у ГСК, не содержащего химических модифицирующих добавок. Особенно она уменьшается в присутствии CaCl_2 (50 мг/л и 250 мг/л) и CrCl_3 (50 мг/л). Удельная электропроводность ГСК, полученных в присутствии суперпластификатора С-3, меньше в четыре раза по сравнению с электропроводностью ГСК,

полученных без добавок. Существенно уменьшают удельную электропроводность ГСК и такие добавки, как сульфатно-дрожжевая барда (СДБ) – продукт сложного химического состава, основу которого составляют лигносульфоновые кислоты и их соли, и Выравниватель «А», особенно при концентрации 250 мг/л. При этой концентрации удельная электропроводность уменьшается в пять раз.

Т а б л и ц а 1

Влияние химических добавок на удельное сопротивление гидросиликатов кальция

№ п/п	Наименование добавки	Концентрация, мг/л	Температура, °С	Удельная электропроводность, Ом ⁻¹ ·см ⁻¹
1	Без добавок	–	75	1·10 ⁻⁷
2	C ₁₄ H ₂₉ OSO ₃ Na	50	75	1,8·10 ⁻⁸
3	C ₁₄ H ₂₉ OSO ₃ Na	250	75	3·10 ⁻⁷
4	Алкамон ОС-2	50	75	1,8·10 ⁻⁷
5	Алкамон ОС-2	250	75	1,2·10 ⁻⁷
6	Прогресс	50	75	3,5·10 ⁻⁸
7	Прогресс	250	75	4,6·10 ⁻⁸
8	Суперпластификатор С-3	50	20	2,5·10 ⁻⁸
9	СДБ	50	20	3,6·10 ⁻⁸
10	СДБ	500	20	3·10 ⁻⁸
11	Выравниватель «А»	50	75	3,2·10 ⁻⁸
12	Выравниватель «А»	250	75	2·10 ⁻⁸
13	AlCl ₃	50	75	2,28·10 ⁻⁸
14	AlCl ₃	250	75	3·10 ⁻⁸
15	BeCl ₂	50	75	4,5·10 ⁻⁸
16	BeCl ₂	250	75	6,3·10 ⁻⁸
17	CaCl ₂	50	75	2,5·10 ⁻⁸
18	CaCl ₂	250	75	1,3·10 ⁻⁸
19	FeCl ₃	50	75	8,7·10 ⁻⁸
20	FeCl ₃	250	75	6,4·10 ⁻⁸
21	FeCl ₃	500	20	4·10 ⁻⁸
22	CrCl ₃	50	75	1,9·10 ⁻⁸
23	CrCl ₃	250	75	2,6·10 ⁻⁸
24	CoCl ₃	50	75	4,3·10 ⁻⁸
25	CoCl ₃	250	75	5,6·10 ⁻⁸
26	BaCl ₂	50	75	4·10 ⁻⁸
27	BaCl ₂	250	75	7·10 ⁻⁸
28	MgCl ₂	50	75	4,5·10 ⁻⁸
29	MgCl ₂	250	75	4,3·10 ⁻⁸
30	Al(NO ₃) ₃	250	20	5·10 ⁻⁸

Поскольку ГСК получены в присутствии добавок, в структуре их присутствуют примесные атомы и молекулы. Молекулы ПАВ и суперпластификаторов имеют в своем составе функциональные группы основного характера, поэтому они являются примесью донорного типа. Апротонные кислоты состоят из катионов и анионов. Катионы – примесь акцепторного типа, а анионы – донорного типа.

Можно предположить, что основной вклад в электропроводность ГСК вносят примесные атомы и молекулы, а также поверхностные межзеренные дефекты и дислокации. Для базальных рефлексов при 3,01–3,18 Å и 1,82 Å были рассчитаны плотности

дислокаций (ρ) в структуре ГСК, полученных в присутствии некоторых добавок. В табл. 2 приведены данные по плотности дислокаций в структуре ГСК.

Т а б л и ц а 2

Расчетные значения плотности дислокаций в структуре гидросиликатов кальция

№ п/п	Наименование добавки	Базальные рефлексы	
		3,01–3,18 Å	1,82 Å
1	Без добавок	$6,4 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{11}$
2	Алкамон ОС-2 (50 мг/л)	$1,4 \cdot 10^{11}$	–
3	Алкамон ОС-2 (250 мг/л)	$7,6 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{11}$
4	Прогресс (50 мг/л)	$1,8 \cdot 10^{11}$	$7,5 \cdot 10^{11}$
5	Прогресс (250 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$7,5 \cdot 10^{11}$
6	AlCl ₃ (50 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$7,5 \cdot 10^{11}$
7	AlCl ₃ (250 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$4,8 \cdot 10^{11}$
8	CaCl ₂ (50 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$4,1 \cdot 10^{11}$
9	CaCl ₂ (250 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$4,8 \cdot 10^{11}$
10	FeCl ₃ (50 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{12}$
11	FeCl ₃ (250 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{12}$
12	BeCl ₂ (50 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{12}$
13	BeCl ₂ (250 мг/л)	$3,3 \cdot 10^{11}$	$7,5 \cdot 10^{11}$

Из табл. 2 видно, что в присутствии анионоактивного вещества Прогресс (250 мг/л) плотность дислокаций в 5,1 раза больше, чем в отсутствие добавок. В присутствии Алкамон ОС-2 (50 мг/л) плотность дислокаций больше в 2,2 раза, а при концентрации, равной 250 мг/л, – только в 1,2 раза.

В присутствии всех апротонных кислот в обеих концентрациях для базального рефлекса при 3,01–3,18 Å плотность дислокаций увеличивается в 5,1 раза. Для базального рефлекса при 1,82 Å значение плотности дислокаций увеличивается в 2,5–7,2 раза, особенно в присутствии апротонных кислот – FeCl₃ и BeCl₂. Следовательно, в присутствии апротонных кислот плотность дислокаций в структуре ГСК больше, чем в присутствии ПАВ. Примесные атомы, находящиеся в междуузлиях кристаллической решетки, являются более подвижными. Именно они должны увеличивать концентрацию носителей зарядов, а значит, и электропроводность. Понижение удельной электропроводности ГСК, полученных в присутствии апротонных кислот, позволяет утверждать, что носители электрических зарядов захватываются дислокациями, а примесные атомы взаимодействуют с дислокациями. В состав кристаллической решетки ГСК входит вода, влияние которой на их свойства трудно переоценить. Молекулы воды связаны водородными связями как с кремнекислородными тетраэдрами, так и между собой. Вода – малодиссоциирующее соединение, но в присутствии таких адсорбентов и катализаторов, какими являются SiO₂ и CaO, она может частично диссоциировать на ионы H⁺ и OH⁻. Подвижность ионов H⁺ зависит от упорядоченности структуры молекул воды в кристаллической решетке ГСК в целом. Уменьшение удельной электропроводности ГСК, полученных в присутствии апротонных кислот, позволяет считать, что дислокации захватывают и протоны. Измерения диэлектрической проницаемости ГСК ϵ [8–10], которая обуславливается ориентационной поляризацией диполей воды, показывают, что в присутствии таких добавок, как тетрадецилсульфат натрия, Алкамон ОС-2, Прогресс, диэлектрическая проницаемость меньше, чем без добавок ПАВ. Такие апротонные кислоты, как AlCl₃ и FeCl₃, также уменьшают диэлектрическую проницаемость, но в меньшей степени.

В то же время CaCl₂ и CrCl₃ в зависимости от концентрации или повышают диэлектрическую проницаемость, или понижают ее.

В присутствии BeCl₂ диэлектрическая проницаемость ГСК практически не изменяется.

Влияние добавок на величину диэлектрической проницаемости объясняется различной степенью связанности молекул воды в кристаллической решетке ГСК. В присутствии добавок ПАВ образуются ГСК, в кристаллической решетке которых молекулы воды находятся в более связанном состоянии. Это хорошо согласуется с данными ИК-спектроскопии. На ИК-спектрах ГСК, полученных в присутствии ПАВ, наблюдается смещение полосы поглощения валентных колебаний молекул воды и ОН-групп в сторону больших длин волн, что указывает на уменьшение частоты колебаний молекул воды, обусловленное большей связанностью молекул воды в структуре ГСК.

Следует отметить, что большие молекулы ПАВ также оказывают упорядочивающее влияние на молекулы воды. Следовательно, молекулы воды в структуре ГСК, полученных в присутствии ПАВ, находятся в более упорядоченном состоянии, и увеличение удельной электропроводности этих ГСК можно объяснить большей подвижностью ионов водорода.

Для оценки технического эффекта использования добавок модифицированных ГСК в качестве затравок нуклеации и кристаллизации на процессы гидратации и твердения дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня были изготовлены опытные образцы сравниваемых серий.

Для изготовления опытных образцов использовали бездобавочный сульфатостойкий портландцемент марки 400 с нормальной густотой, равной 0,26. Было изготовлено двенадцать серий (составов) образцов при В/Ц=0,26. Синтезированные ГСК как затравки структурообразования цементного камня брали в количестве 0,1–0,5 % от массы цемента. После изготовления образцы твердели в лаборатории при нормальных температурно-влажностных условиях. Оценка прочности опытных образцов проводили в возрасте цементного камня 1; 7; 14; 28 и 210 суток, а оценку фазового состава сравниваемых серий образцов – в возрасте 210 суток с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-2. Идентификацию новообразований в образцах проводили на основе полученных ионизационных рентгенограмм по картотеке [11].

В табл. 3 представлен фазовый состав опытных образцов цементного камня, наиболее характерных по техническому эффекту влияния модифицированных добавок ГСК.

Т а б л и ц а 3

Фазовый состав цементного камня в зависимости от модифицирующей добавки гидросиликатов кальция

Шифр состава	Модификатор гидросиликатов кальция	Количество добавки ГСК, %	Предполагаемые фазы
1	2	3	4
1	–	–	CSH(B); тоберморитовый гель; C_4FH_{13} ; алит (1,76 Å)
2	Сульфанол 50 мг/дм ³ , 20 °С	0,5	C-S-H(II); CSH(A); C_3SH_2 ; тоберморитовый гель; $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$; β-кварц
3	С-3 50 мг/л, 20 °С	0,1	CSH(B); CSH(A); $C_2SH(A)$; Ca_2AlFeO_5 ; $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$; β-кварц
4	$MgCl_2$ 250 мг/л, 75 °С	0,1	CSH(B); CSH(A); $C_2SH(A)$; Ca_2AlFeO_5 ; C_4FeH_{13} ; алит (1,76 Å); β-кварц
5	$BaCl_2$ 50 мг/л, 50 °С	0,1	CSH(B); CSH(A); тоберморитовый гель; C_4FeH_{13} ; β-кварц
6	ЛСТ 300 мг/л, 20 °С	0,1	CSH(B); CSH(A); $C_2SH(A)$; C_3SH_2 ; Ca_2AlFeO_5 ; алит (1,76 Å)
7	ЛСТ 300 мг/л, 20 °С	0,5	CSH(B); CSH(A); $C_2SH(C)$; тоберморитовый гель; β-кварц
8	$Al(NO_3)_3$ 250 мг/л, 20 °С	0,5	CSH(B); CSH(A); Ca_2AlFeO_5 ; C_4FeH_{13} ; β-кварц

1	2	3	4
9	CoCl ₂ 50 мг/л, 50 °С	0,5	CSH(B); CSH(A); тоберморитовый гель; C ₄ FeH ₁₃ ; алит (1,76 Å); Ca ₂ AlFeO ₅ ; β-кварц
10	FeCl ₃ 500 мг/л, 20 °С	0,5	CSH(II); CSH(A); тоберморитовый гель; Ca ₂ AlFeO ₅ ; C ₄ FeH ₁₃ ; алит (1,76 Å); β-кварц
11	Выравниватель «А» 250 мг/л, 50 °С	0,1	CSH(B); CSH(A); тоберморитовый гель; Ca ₂ AlFeO ₅ ; C ₄ FeH ₁₃ ; β-кварц
12	Выравниватель «А» 250 мг/л, 50 °С	0,5	CSH(B); CSH(A); тоберморитовый гель; Ca ₂ AlFeO ₅ ; C ₄ FeH ₁₃ ; алит (1,76 Å); β-кварц

Из данных табл. 3 видно, что во всех образцах цементного камня образуются твердые растворы или CSH(B), или C-S-H (II). Распад этих твердых растворов не прошел до конца, так как фаза тоберморита практически не сформировалась. С добавками ГСК, модифицированными как ПАВ, СП, так и апротонными кислотами, образуется фаза CSH(A) с неупорядоченными силоксановыми цепями. Ни в одном образце не сформировались гидроалюминаты кальция. Практически во всех образцах присутствует β-кварц, не вступивший в реакцию с СаОН₂. В образцах цементного камня, полученных с добавками ГСК, модифицированных СП С-3 (0,1 %), ЛСТ (0,5 %) и сульфанолам (0,5 %), ферритные и ферритно-алюминатные фазы не выделяются. С добавками ГСК независимо от природы их модификатора в образцах цементного камня формируется больше фаз по сравнению с контрольными образцами. Особенно много фаз формируется с добавками ГСК, модифицированных Выравнивателем «А», FeCl₃, ЛСТ, С-3, сульфанолам. Как правило, выделившиеся фазы в разной степени конденсированы и обогащены СаО, неоднородны по структуре. Анализ относительных интенсивностей основных максимумов выделяющихся фаз показал, что относительная интенсивность основного максимума гидросиликатных фаз при 3,04–3,06 Å с добавками ГСК меньше, чем у контрольных образцов. Относительная интенсивность максимума, принадлежащего ферритным и ферритно-алюминатным фазам, наоборот, больше.

Результаты механических испытаний опытных образцов сравниваемых серий представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Механическая прочность цементного камня

Шифр состава (серии)	Модификатор ГСК	Количество добавки ГСК, %	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте, сут.				
			1	7	14	28	210
1	2	3	4	5	6	7	8
1	–	–	14,8	48,7	53,2	62,2	85,6
2	Сульфанолам 50 мг/л, 20 °С	0,5	7,5	49,0	52,6	83,7	106,6
3	С-3 50 мг/л, 20 °С	0,1	18,8	65,8	–	79,2	105,0
4	MgCl ₂ 250 мг/л, 75 °С	0,1	17,7	–	52,6	73,3	103,3
5	BaCl ₂ 50 мг/л, 50 °С	0,1	13,0	58,4	67,3	95,5	117,7
6	ЛСТ 300 мг/л, 20 °С	0,1	16,3	–	43,7	60,7	100,0
7	ЛСТ 300 мг/л, 20 °С	0,5	15,6	44,4	58,5	86,6	126,7
8	Al(NO ₃) ₃ 250 мг/л, 20 °С	0,5	47,4	67,4	90,9	102,9	104,8

1	2	3	4	5	6	7	8
9	CoCl ₂ 50 мг/л, 50 °С	0,5	8,6	44,5	59,0	87,0	104,4
10	FeCl ₃ 500 мг/л, 20 °С	0,5	8,4	54,0	68,9	77,8	111,1
11	Выравниватель «А» 250 мг/л, 50 °С	0,1	8,7	60,0	81,6	86,0	118,3
12	Выравниватель «А» 250 мг/л, 50 °С	0,5	8,4	47,4	77,8	100,7	110,3

Из анализа экспериментальных данных, приведенных в табл. 4, следует, что наибольшее увеличение прочности цементного камня относительно контрольного состава показали образцы, полученные с затравками ГСК, модифицированными добавками ЛСТ, Выравниватель «А», BaCl₂ и FeCl₃. Достаточно сильное влияние затравок ГСК на повышение прочности цементного камня, вероятно, обусловлено химической природой ГСК и тех модификаторов, в присутствии которых они синтезированы.

Добавки, в присутствии которых получены ГСК, влияют на степень конденсации, степень закристаллизованности, гранулометрическую однородность структуры ГСК и их фазовый состав. Основными фазами ГСК, использованных в нашем исследовании, являются твердый раствор CSH(B), C-S-H(II), фаза CSH(A), тоберморитоподобная фаза C₄S₅H₅. Но ГСК, полученные в присутствии ЛСТ, оказались более активными, в наибольшей степени повышающими прочность цементного камня. Основным компонентом ЛСТ являются лигносульфонаты кальция. Структурная формула лигносульфоната включает в себя атомы кислорода и бензольные ядра, обладающие повышенной электронной плотностью, а значит, основными свойствами.

Следовательно, молекулы добавки ЛСТ должны адсорбироваться на кислотных центрах. Так как на атомах кремния эффективный заряд значителен, то взаимодействие молекул лигносульфонатов кальция с кислотными центрами будет сильным и происходит разрыв связи –Si–O–Si–. Результат – сильное диспергирование поликремниевой кислоты с образованием большего числа свободных валентностей, обладающих большей энергией.

Действие ГСК на прочностные характеристики цементного камня предположительно сводится к следующему: ГСК более интенсивно взаимодействуют с молекулами воды с образованием триплетных радикальных пар с последующим их переходом в синглетное устойчивое состояние и химической поляризацией ядер, приводящей к активации твердой фазы. Доказательством такого предположения являются спектры ядерно-магнитного резонанса силикатов кальция и тоберморита, описанные в работе [12].

Немаловажное значение для нарастания прочности имеет уменьшение пористости структуры за счет увеличения контактов срастания. Наличие дефектов, причиной возникновения которых является неравенство скоростей активации твердой фазы и формирования структуры, а также гранулометрическая неоднородность структуры, вносит дополнительный вклад в нарастание прочности структуры.

Следует отметить, что введенные в цементное тесто добавки ГСК, обладающие разным переменным составом, плотностью дислокаций и гранулометрической неоднородностью структуры, повышают гранулометрическую неоднородность структуры выделяющихся фаз. Кроме того, при введении добавок ГСК увеличивается концентрация адсорбционных центров, взаимодействующих с водой. Примесные ГСК приводят к различной ориентации блоков мозаики основной структуры цементного камня. Когда же блоки сильно разориентированы, при приложении внешнего напряжения происходит интерференция сдвиговых перемещений дислокаций и их затухание. Такая интерференция упрочняет кристаллы. «Замораживание» дислокаций тем или иным

способом, в том числе и введением примесей – затравок ГСК (легированием), всегда упрочняет структуру.

Таким образом, результаты исследований показали, что прочность возрастает у цементного камня с теми ГСК, удельная электропроводность которых меньше в три-пять раз по сравнению с контрольным образцом. Результаты исследований показали также, что, как правило, прочность повышают те ГСК, у которых в структуре ослаблена водородная связь. Таким образом, данные электрических измерений в сочетании с другими методами, в частности, методом ИК-спектроскопии и рентгеновским методом оценки плотности дислокаций в кристаллической решетке ГСК, позволяют получать дополнительные сведения о структуре ГСК и прогнозировать влияние модифицированных ГСК на прочность цементного камня.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: АСВ, 2007. – 528 с.
2. Карпиелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С.С. Карпиелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1999. – № 6. – С. 6–10.
3. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.
4. Иванов, Ф.М. Добавки в бетон и перспективы применения супепластификаторов / Ф.М. Иванов // в кн.: Бетоны с эффективными суперпластификаторами. – М.: НИИЖБ, 1979. – С. 6–21.
5. Несветаев, Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах / Г.В. Несветаев // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 23–25.
6. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов / В.И. Калашников // Технология бетонов. – 2007. – № 5. – С. 8–10; 2007. – № 6. – С. 8–11; 2008. – № 1. – С. 22–26.
7. Макридин, Н.И. О микроструктуре и синтезе прочности цементного камня с добавками гидросиликатов кальция / Н.И. Макридин, В.Н. Вернигорова, И.Н. Максимова // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 8. – С. 37–42.
8. Вернигорова, В.Н. Влияние добавок на электрические свойства гидросиликатов кальция / В.Н. Вернигорова, Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Башкирский химический журнал. – 2004. – Т. 11, № 4. – С. 38–41.
9. Вернигорова, В.Н. Об электрофизических свойствах гидросиликатов кальция / В.Н. Вернигорова, Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Известия вузов. Строительство. – 2004. – № 12. – С. 30–34.
10. Макридин, Н.И. Электрические свойства модифицированных гидросиликатов кальция / Н.И. Макридин, В.Н. Вернигорова, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2007. – № 2. – С. 109–113.
11. Американская картотека. ASTM. Crystallography. Data for the Calcium Silicates. – London, 1956. – 76 p.
12. Викар, В. Новые методы исследования процессов гидратации портландцементов / В. Викар // Шестой Международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 165–177.

References

1. Bazhenov, Yu.M. Concrete technology / Yu.M. Bazhenov. – M.: ASV, 2007. – 528 p.
2. Karpelov, S.S. Modified Concrete of a New Generation: Reality and Perspective / S.S. Karpelov, V.G. Batrakov, A.V. Scheinfeld // Concrete and reinforced concrete. – 1999. – No. 6. – P. 6–10.
3. Batrakov, V.G. Modified Concrete. Theory and practice / V.G. Batrakov. – 2nd ed. – M.: Stroyizdat, 1998. – 768 p.

4. Ivanov, F.M. Additives in concrete and prospects for the use of super plasticizers / F.M. Ivanov // in the book: Concretes with effective super plasticizers. – M.: NIIZhB, 1979. – P. 6–21.
5. Nesvetaev, G.V. The effectiveness of the use of super plasticizers in concrete / G.V. Nesvetaev // Building materials. – 2006. – No. 10. – P. 23–25.
6. Kalashnikov, V.I. Through the rational rheology of the future of concrete / V.I. Kalashnikov // Concrete technology. – 2007. – No. 5. – P. 8–10; 2007. – No. 6. – P. 8–11; 2008. – No. 1. – P. 22–26.
7. Makridin, N.I. On the microstructure and strength synthesis of cement stone with the addition of calcium hydro silicates / N.I. Makridin, V.N. Vernigorova, I.N. Maksimova // Proceedings of universities. Construction. – 2003. – No. 8. – P. 37–42.
8. Vernigorova, V.N. The effect of additives on the electrical properties of calcium hydro silicates / V.N. Vernigorova, N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Bashkir Chemical Journal. – 2004. – Vol. 11, No. 4. – P. 38–41.
9. Vernigorova, V.N. On the electro physical properties of calcium hydro silicates / V.N. Vernigorova, N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Proceedings of universities. Construction. – 2004. – No. 12. – P. 30–34.
10. Makridin, N.I. Electrical properties of modified calcium hydro silicates / N.I. Makridin, V.N. Vernigorova, I.N. Maksimova // Regional architecture and construction. – 2007. – No. 2 (2). – P. 109–113.
11. American file cabinet. ASTM. Crystallography. Data for the Calcium Silicates. – London, 1956. – 76 p.
12. Vicker, V. New methods for studying the processes of hydration of Portland cement / V. Vicker // Sixth International Congress on the Chemistry of Cement. – M.: Stroyizdat, 1976. – P. 165–177.

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

Мажитов Еркебулан Бисенгалиевич,
аспирант кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
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

Mazhitov Erkebulan Bisengalievich,
Postgraduate of the department «Quality
Management and Construction Technologies»
E-mail: : mazhitov201090@gmail.com

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЗОЛЬ-СИЛИКАТНОЙ КРАСКИ

В.И. Логанина, Е.Б. Мажитов

Приведены сведения об эксплуатационной стойкости покрытий на основе золь-силикатной краски. Показано, что покрытия характеризуются более высокой стойкостью к действию циклического замораживания-оттаивания. Приведены значения свободной энергии поверхности покрытий. Выявлено, что покрытия на основе золь-силикатной краски обладают более высоким значением свободной энергии поверхности с преобладанием полярной составляющей.

Ключевые слова: золь-силикатная краска, стойкость покрытий, межфазное взаимодействие, свободная энергия поверхности

ASSESSMENT OF THE DURABILITY OF COATINGS ON SOL SILICATE PAINT

V.I. Loganina, E.B. Mazhitov

Information is given on the operational stability of coatings based on sol-silicate paint. It is shown that coatings are characterized by higher resistance to cyclic freezing-thawing. The values of free energy of the coating surface are given. It was found that coatings based on sol silicate paint have a higher surface free energy with predominance of a polar component.

Keywords: sol silicate paint, coating resistance, interfacial interaction, free surface energy

В практике отделочных работ хорошо зарекомендовали себя силикатные краски [1, 2]. Срок службы таких покрытий составляет 5–6 лет. Однако покрытия на основе силикатных красок обладают низкой трещиностойкостью, что приводит к раннему «отказу» покрытий и дополнительным затратам на ремонт. В связи с этим актуальным является решение задачи по разработке и внедрению в практику новых трещиностойких силикатных лакокрасочных материалов. Представляет интерес применение в качестве пленкообразователей силикатных красок полисиликатов, которые обеспечивают более высокие эксплуатационные свойства покрытий [3–5]. Полисиликаты характеризуются широким диапазоном степени полимеризации анионов и являются дисперсиями коллоидного кремнезема в водном растворе силикатов щелочных металлов [6].

Нами разработан состав краски на основе полисиликатного связующего, полученного смешиванием жидкого стекла с золей кремниевой кислоты [7–9]. Было установлено, что покрытия на основе золь-силикатной краски характеризуются более бы-

стрым отверждением, прочность при растяжении составляет 2,296 МПа, прочность сцепления 0,8 МПа, коэффициент паропроницаемости 0,00878 мг/м·ч·Па. Краска образует покрытие, характеризующееся ровной однородной матовой поверхностью.

В продолжение дальнейших исследований были проведены испытания покрытий на основе золь-силикатной краски на циклическое воздействие среды. Для определения стойкости покрытий к действию замораживания-оттаивания образцы цементно-песчаного раствора были окрашены силикатной и золь-силикатной краской с промежуточной сушкой в течение 20 минут. После отверждения покрытий были проведены испытания на морозостойкость. Оценка внешнего вида покрытий проводили по ГОСТ 6992-68 «Покрытия лакокрасочные. Метод испытаний на стойкость в атмосферных условиях». За «отказ» принималось состояние покрытия, оценённое III.3 баллами.

Испытания на морозостойкость проходили по следующему режиму. Окрашенные образцы цементно-песчаного раствора после насыщения в воде помещались в морозильную камеру с температурой -15°C и выдерживались 4 часа, после чего помещались в воду с температурой $18-20^{\circ}\text{C}$ на четыре часа (один цикл).

Установлено, что покрытия на основе силикатной краски более подвержены разрушению, состояние покрытия на основе силикатной краски после 35 циклов оценено как АДЗ, АЗЗ.

Результаты испытаний показали, что «отказ» покрытия на основе золь-силикатной краски наступил после 40 циклов замораживания-оттаивания.

Прочность сцепления после 40 циклов испытаний в соответствии с ГОСТ 31149 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза» у покрытий на основе золь-силикатной краски составила 2 балла. Оценка прочности сцепления покрытия с подложкой проводили также методом отрыва штампа (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Прочность сцепления с подложкой после циклов замораживания и оттаивания

Количество циклов	Оценка прочности сцепления покрытия с подложкой методом отрыва штампа
0	$\frac{0,8}{100}$
5	$\frac{0,78}{97,4}$
10	$\frac{0,75}{94,8}$
15	$\frac{0,73}{92,1}$
20	$\frac{0,7}{89,5}$
25	$\frac{0,69}{86,9}$
30	$\frac{0,68}{85}$
35	$\frac{0,65}{81,6}$
40	$\frac{0,63}{79}$

П р и м е ч а н и е . Над чертой указана средняя прочность сцепления отделочного состава (МПа), под чертой – изменение средней прочности сцепления отделочного состава (%).

При оценке сцепления золь-силикатной краски с подложкой рассмотрено межфазное взаимодействие на границе «золь-силикатная краска – подложка». Краевой угол смачивания определяли на приборе KRUSS DSA-30.

В табл. 2 приведены результаты расчётов.

Работа адгезии и смачивания золь-силикатной краски к подложке

Вид краски	Поверхностное натяжение, мН/м	Угол смачивания, град	Работа адгезии, мН/м	Работа когезии, мН/м	Коэффициент смачивания	Работа смачивания, мН/м
Силикатная краска	60,66	65	86,29	121,32	0,711	25,63
Золь силикатная краска	66,18	50,66	108,132	132,36	0,816	41,95

Выявлено, что золь-силикатная краска характеризуется высокой работой адгезии, составляющей 108,132 мН/м, работой смачивания, составляющей 41,95 мН/м, что и определяет высокую прочность сцепления краски с подложкой в процессе замораживания.

Результаты проведенных исследований свидетельствует, что покрытия на основе золь-силикатной краски обладают большей стойкостью при действии знакопеременных температур. Марка по морозостойкости покрытия составила F50.

Более высокая стойкость покрытий на основе золь-силикатной краски по сравнению с силикатной краской обусловлена большим значением свободной энергии поверхности (СЭП) покрытий.

Для определения значения свободной энергии поверхности покрытий был применён метод ОВРК (метод Оугса, Вендта, Рабеля и Кьельбе), при котором рассматривали поверхностное натяжение с точки зрения полярной и дисперсионной составляющих материала [10, 11]. В качестве рабочих жидкостей выбраны вода, этанол, глицерин, этиленгликоль. Полярную и дисперсионную составляющие рассчитывали с помощью линейной регрессии:

$$\frac{\sigma(c+1)}{2\sqrt{\sigma_{рж}^d}} = \frac{\sqrt{\sigma_{п}^p} \cdot \sqrt{\sigma_{рж}^p}}{\sqrt{\sigma_{рж}^d}} + \sqrt{\sigma_{п}^d}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение рабочих жидкостей; $\sigma_{рж}^d$ – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения рабочих жидкостей; $\sigma_{рж}^p$ – полярная составляющая поверхностного натяжения рабочих жидкостей; $\sigma_{п}^d$ – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения исследуемого материала; $\sigma_{п}^p$ – полярная составляющая поверхностного натяжения исследуемого материала; θ – краевой угол смачивания исследуемого материала.

Данное уравнение решается графически: измеряются углы смачивания поверхности жидкостями с известными полярными и дисперсионными составляющими и строится график $y = F(x)$. На рис. 1 и в табл. 3, 4 показаны результаты расчётов.

Свободная энергия поверхности (СЭП) покрытий с полярными и дисперсионными составляющими

Наименование краски	СЭП, мН/м	Дисперсная составляющая, мН/м	Полярная составляющая, мН/м
Силикатная краска на основе калиевого жидкого стекла	63,592	27,04	36,552
Золь-силикатная краска с глицерином	74,119	27,56	46,559

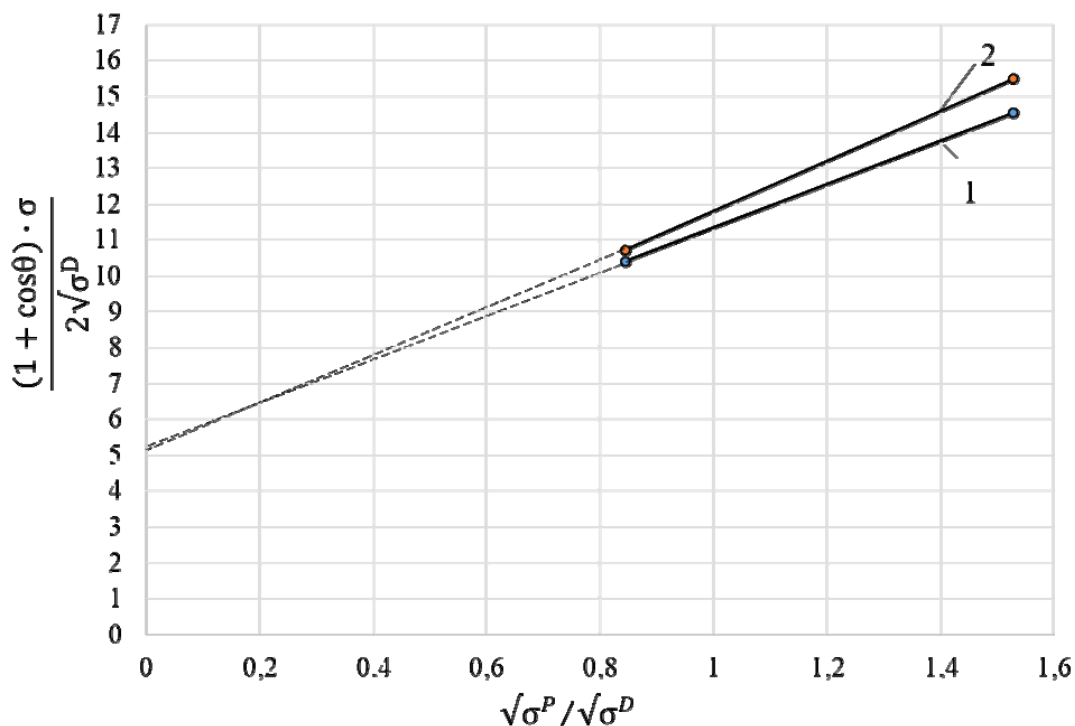


Рис. 1. Свободная энергия поверхности (СЭП) силикатных покрытий:
1 – на основе силикатной краски; 2 – на основе золь-силикатной краски

Анализ данных, приведённых в табл. 3, показывает, что покрытия на основе золь-силикатной краски характеризуется большей свободной энергией поверхности. Так, СЭП для краски на основе калиевого стекла составляет 63,592 мН/м, на основе золь-силикатной краски – 74,119 мН/м. Для всех покрытий преобладает полярная составляющая СЭП.

Было оценено изменение СЭП силикатных покрытий после циклического воздействия среды. Выявлено уменьшение СЭП покрытий после замораживания-оттаивания. Однако уменьшение СЭП покрытия на основе золь силикатной краски с добавкой глицерина после 50 циклов замораживания-оттаивания меньше по сравнению с покрытиями на основе состава без глицерина. Покрытия на основе золь-силикатной краски с добавкой глицерина характеризуются несколько большим значением свободной энергии поверхности, составляющей 64,035 мН/м, в то время как значение СЭП покрытия на основе контрольного состава (без глицерина) – 57,4 мН/м (табл.4). Уменьшение СЭП покрытий происходит в основном за счет дисперсионной составляющей. Отношение полярной к дисперсионной составляющей свободной энергии поверхности для покрытий на основе золь-силикатной краски до испытаний составляет 1,42, а после 50 циклов испытаний – 2,10. Аналогичные закономерности наблюдаются также и для покрытий на основе краски с добавкой глицерина.

Свободная энергия поверхности покрытий после 50 циклов

Покрытие на основе	Свободная энергия поверхности, мН/м	Дисперсионная составляющая свободной энергии поверхности, мН/м	Полярная составляющая свободной энергии поверхности, мН/м	Отношение полярной к дисперсионной составляющей свободной энергии поверхности
Золь-силикатной краски	<u>69,7</u>	<u>28,7</u>	<u>41,0</u>	<u>1,42</u>
	57,4	18,49	38,91	2,10
Золь-силикатной краски с глицерином	<u>74,119</u>	<u>27,56</u>	<u>46,559</u>	<u>1,689</u>
	64,035	20,21	43,825	2,168

П р и м е ч а н и е . Над чертой приведены значения свободной энергии поверхности до испытаний, под чертой – после 50 циклов испытаний на замораживание-оттаивание.

Было также оценено изменение СЭП силикатных покрытий после увлажнения. После увлажнения в течение 7 суток СЭП покрытия на основе золь-силикатной краски составила 61,69 мН/м, а покрытия на основе золь-силикатной краски с добавкой глицерина – 69,035 мН/м.

Анализ экспериментальных данных, приведённых в табл. 5 и на рис.2, свидетельствует, что уменьшение СЭП происходит в основном за счёт уменьшения дисперсионной составляющей. Так, уменьшение после 7 суток увлажнения СЭП покрытия на основе золь-силикатной краски составило 8,003 мН/м, в том числе дисперсионной составляющей 6,61 мН/м, а уменьшение СЭП покрытия на основе золь-силикатной краски с глицерином – 5,084 мН/м, в том числе дисперсионной составляющей 5,35 мН/м. Уменьшение после 7 суток увлажнения СЭП покрытия на основе силикатной краски составило 9,01 мН/м.

Т а б л и ц а 5

Свободная энергия поверхности покрытий

Покрытие на основе	Свободная энергия поверхности, мН/м	Дисперсионная составляющая свободной энергии поверхности, мН/м	Полярная составляющая свободной энергии поверхности, мН/м	Отношение полярной к дисперсионной составляющей свободной энергии поверхности
Золь-силикатной краски	<u>69,7</u>	<u>28,7</u>	<u>41,0</u>	<u>1,42</u>
	61,69	22,09	39,60	1,79
Золь-силикатной краски с глицерином	<u>74,119</u>	<u>27,56</u>	<u>46,559</u>	<u>1,689</u>
	69,035	22,21	44,825	2,018

П р и м е ч а н и е . Над чертой приведены значения свободной энергии поверхности до увлажнения, под чертой – после увлажнения.

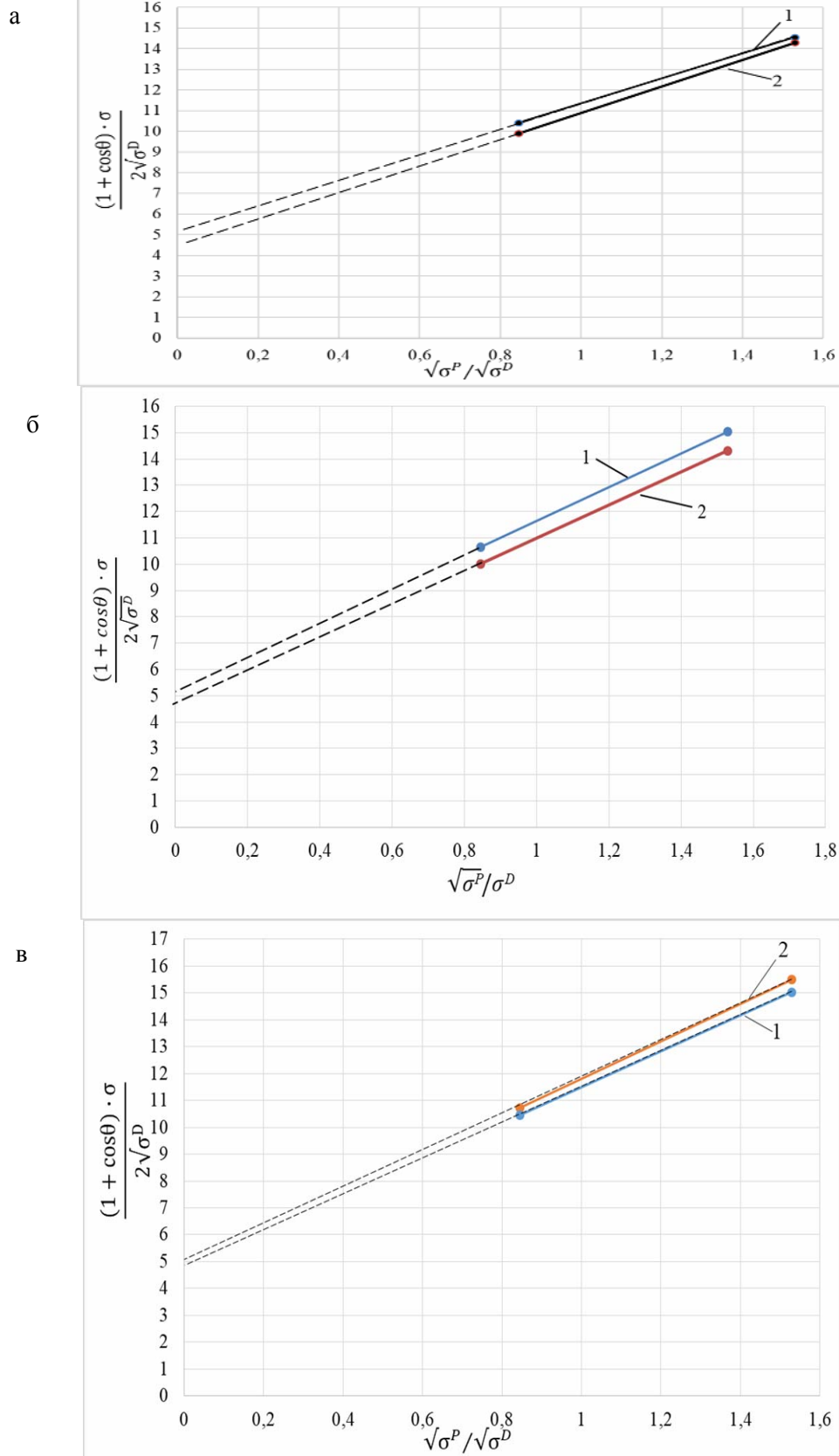


Рис. 2. Функциональная зависимость вида $\cos\theta=f(1/\sigma_{\text{ж}})$ до испытаний покрытий:
 а – на основе силикатной краски; б – на основе золь силикатной краски;
 в – на основе золь силикатной краски с добавкой глицерина;
 1 – до испытаний; 2 – после 7 суток увлажнения

Таким образом, установлено, что покрытия на основе золь-силикатной краски обладают более высокой стойкостью в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Корнеев, В.И. Производство и применение растворимого стекла / В.И. Корнеев, В.В. Данилов. – Л.: Стройиздат, 1991. – 176 с.
2. Айлер Р. Химия кремнезема: в 2 т. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982.
3. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin // J. Scientific Israel-Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14, №1. – P. 7–12.
4. Фиговский, О.Л, Жидкое стекло и водные растворы силикатов как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокпозиционных материалов / О.Л. Фиговский, П.Г. Кудрявцев // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. – 2012. – Т. 4, № 3. – С.6–21.
5. Figovsky, O. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete. International / O. Figovsky, D. Beilin // Journal of Concrete Structures and Materials. – 2009. – Vol. 3, No. 2. – P. 97–101.
6. Получение и применение гидрозолей кремнезема / под ред. Ю. Г. Фролова // Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева. – М., 1979.
7. 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.
8. 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.
9. 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, вып. 7. – С.877–884.
10. Айзенштадт, А.М. Основы термодинамики высокодисперсных систем горных пород для строительных композитов (теория и практика) / А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, А.С. Тутьгин. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. – 113 с.
11. Тутьгин, А.С. Физико-химия поверхности высокодисперсных систем / А.С. Тутьгин, А.М. Айзенштадт, Т.А. Дроздюк. – Архангельск, 2017. – 128 с.

References

1. Korneev, V.I., Danilov, V.V. Production and use of soluble glass. – L.: Stroizdat, 1991. – 176 p.
2. Ailer, P. Chemistry of silica: in 2 vol. / P. Euler. – M.: Mir, 1982.
3. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin // J. Scientific Israel-Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14, №1. – P. 7–12.
4. Figovsky, O.L. Liquid glass and water solutions of silicates, as a promising basis of technological processes for obtaining new nanocomposite materials / O.L. Figovsky, P.G. Kudryavtsev // Nanotechnologies in construction: a scientific Internet journal. – 2012. – Vol. 4, No. 3. – P.6–21.
5. Figovsky, O. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete. International / O. Figovsky, D. Beilin // Journal of Concrete Structures and Materials. – 2009. – Vol. 3, No. 2. – P. 97–101.
6. Preparation and use of silica hydrosols / ed. Yu. G. Frolova // Trudy MHTI them. D. I. Mendeleev. – M., 1979.
7. Loganina, V.I. Development of the formulation of sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Regional architecture and engineering. – 2017. – №3. – P.51–53.

8. 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). – С.17–23.

9. 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, Iss. 7. – P.877–884.

10. Aizenshtadt, A.M. Fundamentals of thermodynamics of finely dispersed rock systems for building composites (theory and practice) / A.M. Aizenshtadt, M.A. Frolova, A.S. Tutygin. – Arkhangelsk: CPC NArFU, 2013. – 113 с.

11. Tutygin, A.S. Physical chemistry of the surface of finely dispersed systems / A.S. Tutygin, A.M. Aizenshtadt, T.A. Drozdyuk. – Arkhangelsk, 2017. – 128 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

Кислицына Светлана Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: kislitsyns_sn@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

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

Kislitsyna Svetlana Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Technology of Building
Materials and Woodworking»
E-mail: kislitsyns_sn@mail.ru

ИЗВЕСТКОВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ ИЗВЕСТНЯКОВОГО КАМНЯ

В.И. Логанина, С.Н. Кислицына

Приведены сведения об известковой композиции, применяемой для реставрации известняка. Показано, что применение в рецептуре известковой композиции полисиликатного раствора способствует повышению прочности сцепления композиции с основанием, ускорению отверждения. Рассмотрено физико-химическое взаимодействие известки с полисиликатным раствором, жидким стеклом. Показано, что полисиликатный раствор обладает более высокой активностью взаимодействия с известью по сравнению с золем кремниевой кислоты и жидким стеклом.

Ключевые слова: реставрация, известняк, известь, полисиликатный раствор

LIME COMPOSITIONS FOR RESTORATION OF LIMESTONE

V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna

The information on the lime composition used for restoration of limestone is given. It is shown that the use of a polysilicate solution in the formulation of calcareous composition helps to increase the adhesion strength of the composition with the base and accelerate curing. The physicochemical interaction of lime with a polysilicate solution and liquid glass is considered. It was shown that a polysilicate solution has a higher activity of interaction with lime compared with silica sol and liquid glass.

Keywords: restoration, limestone, lime, polysilicate solution

Проблема сохранения исторического наследия занимает одно из ведущих мест в современном градостроительстве. В результате процессов физического выветривания, воздействия агрессивной внешней среды происходит разрушение природного камня. Для реставрации и санации зданий применяют специализированные материалы, позволяющие не только восстановить внешний облик сооружения, но и сделать его пригодным для эксплуатации. Учитывая закон сродства структур для реставрации, необходимо применять аутентичные реставрационные материалы.

При реставрации памятников архитектуры, выполненных из известняка, установлена эффективность применения золя кремниевой кислоты. Фирмой «Сталкер» (Россия) для укрепления белого камня, мрамора, песчаника и изделий из природного и искусственного камня предлагается состав АКЦИЛ БеКам-1 на основе этилового эфира кремниевой кислоты. Состав обеспечивает глубинную обработку. При отверждении

материала образуются твердые продукты, не адсорбирующие грязь. Обработанные поверхности становятся атмосферостойкими, в т.ч. к кислотным дождям, и остаются паропроницаемыми [1].

Фирмой Remmers предложены разные типы укрепления, различающиеся по следующим критериям:

- по содержанию вяжущего (так называемая степень осаждения геля);
- по структуре геля;
- по типу связки с основанием [2].

Проведенные ранее исследования подтвердили эффективность применения для реставрации зданий исторической застройки известкового состава, в рецептуре которого содержится золь кремниевой кислоты [3–5]. Методами рентгенофазового анализа и оптической микроскопии выявлено, что в присутствии золя кремниевой кислоты основными продуктами твердения являются гидратные фазы, близкие по химическому составу к C-S-H (II), а также кальцит и известь. При введении в известковую композицию золь кремниевой кислоты формируется термодинамически устойчивая мелкокристаллическая структура известкового камня посредством образования центров кристаллизации, состоящих из продуктов химического взаимодействия наноразмерных частиц кремнезема с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а также вследствие их адсорбции на границе раздела фаз, обеспечивающей блокирование роста и перекристаллизации кристаллов извести.

Покрываются на основе разработанных известковых составов обладают повышенной трещиностойкостью, характеризуются когезионной и адгезионной прочностью, составляющей соответственно 1,5...1,9 МПа и 0,8...1,2 МПа, стойкостью к статическому воздействию воды не менее 72ч.

В продолжение дальнейших исследований была оценена эффективность применения в известковых составах, предназначенных для реставрации памятников архитектуры, выполненных из известняка, полисиликатного раствора. Полисиликатные растворы обладают рядом преимуществ по сравнению с зольми и жидкими стеклами, так как содержат в своем составе, наряду с частицами золя, мономер, олигомеры и полимерные разновидности кремнезема [6–8]. Установлено, что введение золя (повышение силикатного модуля) способствует увеличению доли высокополимерных фракций кремнекислородных анионов (ККА), причем с увеличением содержания золя доля полимерной формы кремнезема возрастает. Так, при добавлении золя кремниевой кислоты Nanosil 20 в количестве 5% от массы натриевого жидкого стекла увеличивается содержание полимерной формы кремнезема $\gamma\text{-SiO}_2$ до 5,345%, в количестве 15% – до 12,04%, в то время как в контрольном составе (без добавки золя) – 2,783%. В калиевом полисиликатном растворе содержание полимерной формы кремнезема $\gamma\text{-SiO}_2$ составляет 19,93% при содержании золя 15%. Результаты исследований приведены в табл.1.

Т а б л и ц а 1

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

Содержание золя, %	Натриевое жидкое стекло			Калиевое жидкое стекло		
	Общее содержание кремнезема SiO_2 , %	Содержание $\alpha\text{-SiO}_2 + \beta\text{-SiO}_2$, %	Содержание $\gamma\text{-SiO}_2$, %	Общее содержание кремнезема SiO_2 , %	Содержание $\alpha\text{-SiO}_2 + \beta\text{-SiO}_2$, %	Содержание $\gamma\text{-SiO}_2$, %
0	23,72	20,93	2,783	21,9	19,38	2,51
5	25,63	20,28	5,345	27,71	18,61	9,1
10	27,02	19,79	7,22	31,39	17,71	13,67
15	30,57	18,83	12,04	34,93	15	19,93

При смешивании жидкого стекла с золом кремниевой кислоты вследствие высокой щелочности среды ($\text{pH} = 10,7\text{--}12,41$) обеспечивается высокая скорость растворения коллоидных частиц SiO_2 . Образующийся низкополимерный кремнезем в растворе существует в виде остатков низкополимерных и олигомерных поликремниевых кислот. В результате щелочность снижается и стабилизируется в области значений pH $10,3\text{--}11,4$ в зависимости от содержания золя. Зависимость содержания кремнезема $\alpha\text{-SiO}_2$ на ранних стадиях взаимодействия золя с жидким стеклом носит экстремальный характер. Максимальное содержание $\alpha\text{-SiO}_2$ наблюдается спустя 60 минут в зависимости от вида жидкого стекла и количества введенного золя. Так, спустя 60 минут содержание кремнезема $\alpha\text{-SiO}_2$ в натриевом полисиликатном растворе составляет 18,54% при содержании 5% золя, а в калиевом полисиликатном растворе 6,97 % при содержании 5% золя.

Повышение содержания золя способствует увеличению доли высокополимерных фракций кремнекислородных анионов (ККА). Так, при содержании золя Nanosil 20 в калиевом полисиликатном растворе в количестве 5% содержание высокополимерных фракций возрастает до 7,1 %, а при содержании золя в количестве 15% – до 19,95%.

Наличие в составе полисиликатного связующего полимерных разновидностей кремнезема обеспечивает повышение стойкости силикатных покрытий. На основе полисиликатного раствора нами разработан состав для структурного выравнивания поверхности известнякового камня.

Полисиликатный раствор получали смешением жидкого стекла и золя кремниевой кислоты. Применяли золь кремниевой кислоты Nanosil 20, выпускаемый ПК «Промстеклоцентр», и натриевое жидкое стекло с модулем $M=2,78$. Установлено, что использование золя в количестве 15–30% от массы жидкого стекла с модулем $M=2,78$ позволяет получить полисиликатные растворы с модулем $M=4,25\text{--}5,29$. Молибдатным методом установлено, что в полисиликатном растворе содержание полимерной формы кремнезема $\gamma\text{-SiO}_2$ составляет 15–19,93% в зависимости от содержания золя кремниевой кислоты [9, 10]. Такой состав полисиликатного раствора способствует проявлению высокой реакционной способности кремнезема в составе различных композиций [11].

Для оценки физико-химического взаимодействия извести с полисиликатным раствором были оценены работа адгезии к извести и энтальпия смачивания. Исследования выполнены с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. Краевой угол смачивания определяли на приборе KRUSSDSA-30. Для определения краевого угла смачивания были заформованы таблетки из кальцита с помощью автоматического гидравлического пресса Vaneox–40t automatic с давлением в 18 тонн за 11 секунд. Порошок прессовали в сухом состоянии, без дополнительной обработки. Поверхностное натяжение растворов определяли сталагмометрическим методом. В качестве эталонной жидкости использовали дистиллированную воду с плотностью $\rho_m^{20^\circ\text{C}} = 0,9982 \text{ г/см}^3$ и поверхностным натяжением $\sigma^{20^\circ\text{C}} = 72,8 \text{ мН/м}$.

Работу адгезии жидкости A вычисляли по формуле

$$A = \sigma(1 + \cos \theta), \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; θ – краевой угол смачивания, град.

Связь между работой адгезии и работой смачивания определяется соотношением

$$W = A - \sigma. \quad (2)$$

Для определения энтальпии смачивания применялся сосуд Дьюара, расчет проводили по формуле

$$H_{см} = \frac{\Delta T (c_{из} m_{из} + c_{жид} m_{жид})}{m_{из}}, \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; ΔT – изменение температуры, $^\circ$; $m_{жид}$ – масса жидкости, кг ; $m_{из}$ – масса извести, кг .

Результаты исследований и расчетов приведены в табл.2.

Значения работы смачивания

Наименование ингредиентов	Работа адгезии, мН/м	Работа смачивания, мН/м	Энтальпия смачивания, Дж/кг
Известь+вода	116,6	43,68	5345
Известь+ полисиликатный раствор	106,1	36,3	5060

Результаты, приведенные в табл.2, свидетельствуют, что для воды характерна более высокая работы адгезии к извести, составляющая 116,6 мДж/кг, более высокое значение работы смачивания по сравнению с полисиликатным раствором.

Однако полисиликатный раствор обладает более высокой реакционной активностью. Об этом свидетельствует значения прочности известкового камня. В возрасте 28 суток с момента затворения прочность при сжатии контрольных образцов известкового камня составляет 1,55 МПа, а с применением полисиликатного раствора – 5,42 МПа. В случае применения полисиликатного раствора наблюдается уменьшение в 3 раза усадочных деформаций.

Предложенный нами состав характеризуется хорошей удобоносимостью, время высыхания до степени 3 составляет 10 минут. Прочность сцепления покрытия с подложкой из известнякового камня, определяемая методом отрыва шайб, составляет более 1,3 МПа.

Список литературы

1. <http://www.aksil.ru/catalog/62-bekam1.html>
2. <https://remmers.ru/catalog/restavraciya-i-zashhita-pamyatnikov/konservaciya-prirodnogo-kamnya/kamneukrepiteli/>
3. Логанина, В.И. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, О.А. Давыдова // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 53–57.
4. Логанина, В.И. Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 3 (627). – С. 20–23.
5. Никифоров, Е.А. Особенности структурообразования известковых композитов с применением модифицированного диатомита / Е.А. Никифоров, В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 2. – С. 4–8.
6. Получение и применение гидрозолей кремнезема / под ред. проф. Ю.Г. Фролова // Труды МХТИ им. Менделеева. – М., 1979. – С. 37.
7. Figovskiy, O.L. Nanostructured Silicate Polymer Concrete / O.L. Figovskiy, D.A. Beylin // Vestnik MGSU. – 2014. – N 3. – P. 197–204.
8. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries / P.G. Kudryavtsev // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2014. – Vol.16, N2. – P.147–170.
9. 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.
10. 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). – С. 74–79.
11. Айлер, Р. Химия кремнезема: в 2 т. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982.

References

1. <http://www.aksil.ru/catalog/62-bekam1.html>
2. <https://remmers.ru/catalog/restavraciya-i-zashhita-pamyatnikov/konservaciya-prirodnogo-kamnya/kamneukrepiteli/>
3. Loganina, V.I. Optimization of the composition of general purpose composites modified with nanoscale additives / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, O.A. Davydova // Regional architecture and engineering. – 2010. – No. 2. – P. 53–57.
4. Loganina, V.I. The effect of diatomite activation on the properties of calcareous compositions / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // News of higher education institutions. Construction. – 2011. – No 3 (627). – P. 20–23.
5. Nikiforov, E.A. Features of the structure formation of calcareous composites using modified diatomite / E.A. Nikiforov, V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Regional architecture and engineering. – 2011. – No 2. – P. 4–8.
6. Obtaining and using silica hydrosols. / Ed. prof. Yu.G. Frolova // Proceedings of the Moscow Art Theater. Mendeleev. – M., 1979. – P. 37.
7. Figovskiy, O.L. Nanostructured Silicate Polymer Concrete / O.L. Figovskiy, D.A. Beylin // Vestnik MGSU. – 2014. – N 3. – P. 197–204.
8. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries / P.G. Kudryavtsev // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2014. – Vol.16, N2. – P.147–170.
9. Loganina, V.I. Formulation of sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 3. – P.51–53.
10. Loganina, V.I. Properties of liquid glass with the addition of a silica sol / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // News of higher educational institutions. Construction. – 2017. – No. 8 (704). – P. 74–79.
11. Ailer, P. Chemistry of silica: in 2 vol. / P. Euler. – M.: Mir, 1982.

УДК 005.6:621.64

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

Макарова Людмила Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: Mak.78_08@inbox.ru

Тарасов Роман Викторович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: rwtarasow@rambler.ru

Баукова Наталья Сергеевна,
магистрант
E-mail: rabota-penza89@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

Makarova Ludmila Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Management of Quality and
Technology of Construction Production»
E-mail: Mak.78_08@inbox.ru

Tarasov Roman Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Management of Quality and
Technology of Construction Production»
E-mail: rwtarasow@rambler.ru

Baukova Natalya Sergeevna,
Undergraduate
E-mail: rabota-penza89@mail.ru

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ КОРРЕКТИРУЮЩИХ И ПРЕДУПРЕЖДАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЕМКОСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, Н.С. Баукова

С целью повышения качества и конкурентоспособности продукции многие российские промышленные предприятия перешли на международные стандарты серии ИСО 9000 в области качества продукции. Корректирующие и предупреждающие действия относятся к значимым документированным процедурам в системе менеджмента качества, своевременная реализация которых позволит устранить несоответствия, выявленные в технологическом процессе изготовления продукции, в процессах системы качества и организации в целом, минимизировать количество претензий со стороны заказчика и тем самым способствовать повышению качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции и предприятия в целом. В свою очередь, необходимо оценивать результативность разработки и реализации корректирующих действий. В статье приводится методика оценки эффективности корректирующих и предупреждающих действий с применением критерия Г. Тагути «сигнал/шум» при производстве емкостного оборудования.

Ключевые слова: качество продукции, конкурентоспособность, несоответствия, корректирующие действия, предупреждающие действия, экспертный метод оценки

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF IMPLEMENTING CORRECTIVE AND PREVENTIVE ACTIONS AS AN ELEMENT OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN THE PRODUCTION OF CAPACITIVE EQUIPMENT

L.V. Makarova, R.V. Tarasov, N.S. Baukova

In order to improve the quality and competetiveness of products, many Russian industrial enterprises have switched to international standards of ISO 9000 series in the field of product quality. Corrective and preventive actions deal with significant documented procedures in the quality management system, their due implementation will eliminate the errors identified in the manufacturing process of the product, in the processes of the quality system and the whole

organization minimize the number of complaints from the customer and thus contribute to improving the quality and competitiveness of products and the enterprise as a whole. Besides, it is necessary to evaluate the effectiveness of the development and implementation of corrective actions. The article provides a methodology for evaluating the effectiveness of corrective and preventive actions using G. Taguchi signal-to-noise criterion in the production of capacitive equipment.

Keywords: product quality, competitiveness, inconsistencies, corrective actions, preventive actions, expert assessment method

Конкурентная среда, являющаяся неотъемлемой частью рыночной экономики, обязывает производителей промышленной продукции уделять особое внимание проблеме качества. Качество продукции и услуг является одним из важнейших факторов, характеризующих направленность социально-экономического развития общества, деятельности любой организации.

Достижение высокого уровня качества продукции – комплексная задача деятельности предприятия (организации), основанная на управлении качеством на всех этапах жизненного цикла продукции [1]. Эффективным инструментом управления качеством на предприятии, как показала мировая практика, является разработка и внедрение системы менеджмента качества, в основу которой положен процессный подход [2].

Производственный процесс – ключевой этап создания высококачественной продукции, не только отвечающей требованиям нормативной документации, но и имеющей определенные конкурентные преимущества по сравнению с мировыми аналогами. Управление качеством продукции в процессе производства требует применения статистических методов, позволяющих не только организовать сбор достоверной информации на различных этапах производственного цикла, но разработать комплекс корректирующих и предупреждающих действий как средство оперативного вмешательства в процесс производства.

Объектом исследования в рамках разрабатываемой системы менеджмента качества явилась продукция ООО «Пензенский завод крупногабаритного оборудования», а именно емкостное оборудование.

Качество емкостного оборудования, как и любой другой продукции, определяется совокупностью свойств, обуславливающих её пригодность удовлетворять определённые потребности в соответствии с её назначением.

Основными показателями качества емкостного оборудования являются: рабочее или номинальное давление, расчётное давление, рабочая температура (максимальная), расчётная температура стенки, вместимость аппарата, материальное исполнение корпуса аппарата, назначенный срок службы аппарата, качество сварных соединений, герметичность сосуда, наличие маркировки, наличие рубашки, трубного пучка или змеевика, качество лакокрасочного покрытия.

Оценку уровня качества емкостного оборудования, выпускаемого ООО «Пензенский завод крупногабаритного оборудования», проводили с использованием дифференциального метода, основанного на сравнении единичных показателей качества рассматриваемого образца продукции с показателями качества базового образца и продукции ближайшего конкурента [2].

Результаты расчета уровня качества емкостного оборудования по выборочным показателям качества представлены в табл. 1.

Циклограммы сопоставления показателя качества емкостного оборудования ООО «Пензенский завод крупногабаритного оборудования» (ООО ПЗКО) с требованиями ГОСТ 34347-2017 и с показателями качества емкостного оборудования ОАО «Пензхиммаш» (ОАО ПХМ) показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

Оценка уровня качества емкостного оборудования

	Наименование показателя качества	Значение абсолютного показателя качества			Значение относительного показателя качества	
		Емкостное оборудование ООО ПЗКО	Емкостное оборудование ОАО ПХМ	ГОСТ 34347	Емкостное оборудование ООО ПЗКО по сравнению с требованиями ГОСТ 34347	Емкостное оборудование ОАО ПХМ по сравнению с требованиями ГОСТ 34347
1	Рабочее или номинальное давление, МПа	3,86	5,5	4,0/6,3	1,04	0,87
2	Расчётное давление, МПа	4,0	5,0	До 5,0	1,25	1,00
3	Рабочая температура, С (максимальная)	35	35	От минус 40 до 200 °С	1,00	1,00
4	Вместимость аппарата (объем), м ³	50	100	0,040 – 200	1,00	1,00
5	Материальное исполнение корпуса аппарата	09Г2С	09Г2С	09Г2С	1,00	1,00
6	Назначенный срок службы аппарата, лет	30	20	Не менее 10	3,00	2,00
7	Наличие рубашки, трубного пучка или змеевика	1	1	1 – да; 0 – нет.	1,00	1,00
8	Герметичность сосуда	1	1	1 – да; 0 – нет.	1,00	1,00
9	Наличие маркировки	1	1	1 – да; 0 – нет.	1,00	1,00



Рис. 1

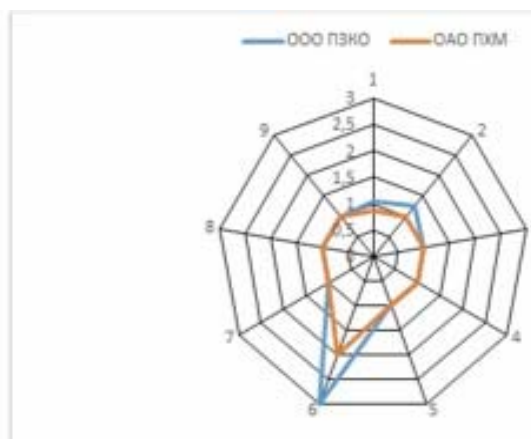


Рис.2

По результатам расчетов относительных значений показателей качества можно сделать следующие выводы:

- выпускаемое емкостное оборудование удовлетворяет требованиям нормативной документации, так как все значения относительных показателей больше единицы;
- качество емкостного оборудования ООО ПЗКО соответствует ГОСТ 34347 и незначительно превосходит качество емкостного оборудования ОАО ПХМ.

Вместе с тем при производстве емкостного оборудования могут возникать следующие виды несоответствий (дефектов) (рис. 3):

1 – дефекты сварных соединений: удары сварочной дугой, растрескивание шва, усадочные раковины в сварном шве, вогнутость корня шва, смещение сваренных кромок, свищи в сварном шве, непровары, прожоги, шлаковые включения, брызги металла; поверхностное окисление сварного соединения; подрезы зоны сплавления, наплывы на сварном соединении;

2 – дефекты покрытий: подтеки, непрокрас, включения;

3 – отсутствие идентификации продукции;

4 – нарушение порядка складирования металлопроката, труб, отводов;

5 – нарушение требований технологии в части механической обработки окрашенных деталей;

6 – нарушение порядка отдельного хранения черных и цветных металлов по наименованиям, маркам, сортам, плавкам;

7 – низкий уровень организации прослеживаемости материалов.

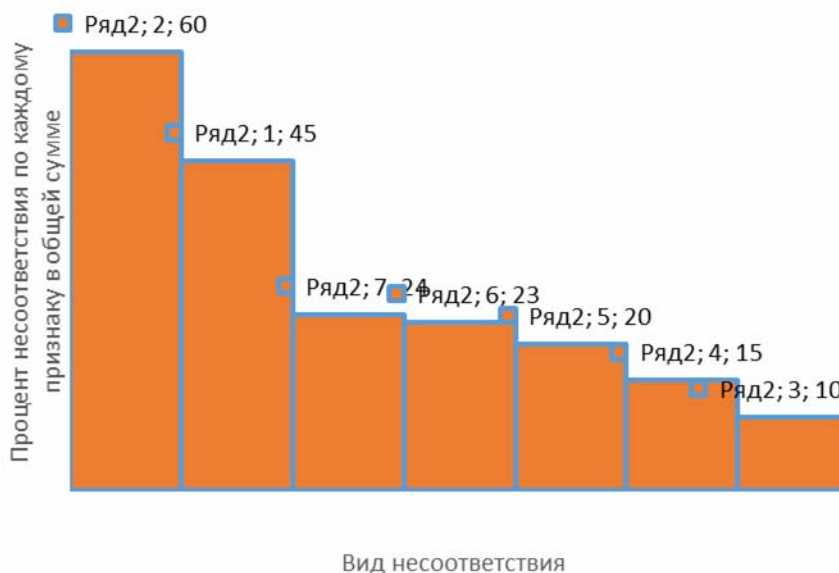


Рис. 3. Виды несоответствий

Для устранения выявленных несоответствий был разработан комплекс корректирующих, а для предупреждения их появления в дальнейшем – предупреждающих действий (ПД). Корректирующие действия (КД), разработанные по результатам проведенного внешнего (технического) аудита в ООО «Пензенский завод крупногабаритного оборудования», приведены в табл. 2.

Реализация мероприятий, направленных на обеспечение или повышение качества продукции, должна учитывать степень их эффективности [3]. В связи с этим для анализа эффективности КД и ПД была проведена экспертная оценка каждого мероприятия.

Корректирующие действия, разработанные по результатам технического аудита

Наименование несоответствия	Причина возникновения несоответствия	КД и ПД
1	2	3
Отсутствует идентификация на заготовках (обечайках), находящихся на заготовительном участке, – нарушение требований Р 50-601-36-93, 9МОК-7.5.3-БНС «Порядок идентификации продукции в процессе производства»	Недостаточное знание исполнителями требований 9МОК-7.5.3-БНС	1 Ответственным исполнителям повторно изучить 9МОК-7.5.3-БНС. 2 Исполнителям выполнять требования 9МОК-7.5.3-БНС
	Недостаточный контроль со стороны мастерского состава за выполнением требований 9МОК-7.5.3-БНС	Усилить проведение контроля выполнения требований 9МОК-7.5.3-БНС в части идентификации заготовок со стороны мастерского состава
На сварочных материалах (электроды УОНИ 13/55), выданных в производство, отсутствуют бирки об идентификации применяемых сварочных материалов	Недостаточное знание исполнителем требования РД57-7.5.1-ОГС «Организация хранения, подготовки, транспортировки и обеспечения цехов сварочными материалами»	1. Кладовщице кладовой повторно изучить требования РД57-7.5.1-ОГС «Организация хранения, подготовки, транспортировки и обеспечения цехов сварочными материалами» 2. Кладовщице кладовой строго соблюдать требования РД57-7.5.1-ОГС в части выдачи сварочных материалов в цех
На складских территориях имеется неидентифицированная продукция (метизы, прокладки)	Недостаточное знание исполнителями требований 9МОК-7.5.3-БНС.	1. Ответственным исполнителям повторно изучить 9МОК-7.5.3-БНС 2. Произвести ревизию продукции (метизы, прокладки), находящейся в кладовой
На складах выявлен низкий уровень организации прослеживаемости материалов и комплектующих (имеются только журналы выдачи материалов) – нарушение РД 92-0256-89, Р 50-601-36- 93	Незнание исполнителем требований РД 92-0256-89, Р 50-601-36- 93	1. Завести карточки учета типовой межотраслевой формы № М-17. 2. Завести журнал входного контроля сварочных материалов. 3. Завести журнал учета материалов в кладовой
Выявлено нарушение технологии ОТТ 56-09, окрашенные детали не были предварительно механически обработаны, а именно на комплекте ответных фланцев имеются заусенцы острые радиусом более 2,0 мм	Недостаточное знание исполнителями требований технологии ОТТ 56-09 Отсутствие контроля со стороны мастерского состава за соблюдением ОТТ 56-09	1. Ознакомить исполнителей с технологией. 2. Ответственным за нанесение ЛКП не наносить ЛКП на детали, имеющие острые кромки, заусенцы. 3. Обеспечить постоянный контроль со стороны мастерского состава за соблюдением ОТТ 56-09
При осмотре окрашенных поверхностей обнаружены дефекты покрытий (потёки, непрокрас, включения)	1. Отсутствие контроля состояния воздуха, подаваемого системой на абразивоструйные аппараты, на наличие содержания в нем воды, масла и других жиросодержащих веществ (проверяется до начала абразивоструйной очистки)	1. Организовать контроль состояния воздуха, подаваемого системой на абразивоструйные аппараты, на наличие содержания в нем воды, масла и других жиросодержащих веществ (проверяется до начала абразивоструйной очистки) в соответствии с ASTM D 4285 с регистрацией в журнале

1	2	3
	<p>2. Нарушения требований ГОСТ 9.032-74, а также 19РИ-4.9-ОГТ при проведении лакокрасочных работ.</p> <p>3. Несоблюдение требований техпроцесса подготовки под окраску, нанесения покрытия и режимов сушки лакокрасочных материалов</p> <p>4. Отсутствие регистрации контроля:</p> <ul style="list-style-type: none"> – параметров окружающей среды при проведении лакокрасочных работ – качества абразивного материала – качества поверхности после дробеструйной обработки перед нанесением грунтовки – нанесения и высыхания грунтовки – нанесения и высыхания промежуточного слоя покрытия – нанесения и высыхания финишного слоя покрытия <p>5. Отсутствие навыков у персонала, выполняющего проверки и испытания, необходимых для обеспечения соответствия подготовки поверхности и покраски установленным требованиям ТУ сертификации по уровню 2 NACE</p>	<p>2. До проведения лакокрасочных работ осуществлять контроль поверхностей, очищенных абразивом, на предмет надлежащей чистоты поверхности и профиля шероховатости на соответствие требованиям ISO 8503-2, или NACE SP 0287 с регистрацией в журнале контроля абразивоструйных и окрасочных работ</p> <p>3. При проведении лакокрасочных работ осуществлять контроль параметров окружающей среды – влажности, температуры, точки росы – с регистрацией в журнале производства и контроля работ по нанесению лакокрасочных покрытий</p> <p>4. При проведении лакокрасочных работ осуществлять замеры толщин мокрого слоя (WFT) и сухого слоя (DFT) на соответствие ISO 19840 с регистрацией в журнале производства и контроля работ по нанесению лакокрасочных покрытий</p> <p>5. Организовать обучение персонала с последующей сертификацией по уровню 2 NACE или уровню 3 FROSIO (или эквивалентному уровню)</p> <p>6. Соблюдать требования техпроцесса подготовки под окраску, нанесения покрытия, а также режимов сушки лакокрасочных материалов ответственными исполнителями</p>
<p>При проведении внутреннего осмотра реактора двухступенчатого выявлены дефекты:</p> <ul style="list-style-type: none"> – случайное оплавление основного металла в результате зажигания или гашения дуги патрубка штуцеров А2, В2, А1, В1 – раковины от вдавленной окалины (левое днище, чертеж 203.7261.00.000СБ, лист 2) – шлак, брызги металла, подрезы (сварной шов № 21, патрубок штуцера В1) 	<p>1. Низкое качество электродов, используемых при проведении сварочных работ</p> <p>2. Несоблюдение технологии сварки</p> <p>3. Недостаточно тщательно подготовленная поверхность свариваемого материала</p> <p>4. Некачественный внутренний осмотр реактора двухступенчатого со стороны бригадира, начальника участка, а также работников БТК</p>	<p>1. Удалить шлак</p> <p>2. Зачистить места подреза, подварить швы</p> <p>3. Зачистить поверхность, применить защитное покрытие марки П1, П2</p> <p>4. Усилить контроль за качеством выполнения сварочных работ со стороны ОГС</p> <p>5. Решить вопрос о депремировании сварщика, нарушившего сварочную технологию, и работников БТК</p>

Для оценки эффективности проводимых мероприятий можно применять методы Тагути, а именно оценивать устойчивость технических характеристик как взаимодействие между «сигналом» и «шумом», который является причиной разброса характеристик.

Эксперт на основе анализа причин возникновения дефекта и выполненных действий по устранению несоответствий выставляет баллы (2 балла – полное устранение; 1 балл – частичное устранение; 0 баллов – дальнейшее повторение несоответствия), затем оценки экспертной группы систематизируются для расчетов критерия «сигнал/шум» (рис. 4).

Критерий «сигнал/шум» рассчитывается по следующей формуле [4, 5]:

$$C/Ш = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{D}, \tag{1}$$

где \bar{y}^2 – математическое ожидание отклика; D – дисперсия.

Дисперсия определяется по формуле

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \tag{2}$$

где y_i - отклик (оценка эксперта); n – количество экспертов.

Чем больше отношение сигнал/шум, тем предпочтительнее КД/ПД.

На предприятии была проведена экспертная оценка применимости КД и ПД для дальнейшего анализа изготовления промышленного оборудования. Результаты проведенной оценки, а также расчет критерия «сигнал/шум» для каждого метода приведены в табл. 3, 4 соответственно.

Таблица 3

Бланк экспертной оценки КД и ПД

№ п/п	Корректирующие/предупреждающие действия	Эксперт №1	Эксперт №2	Эксперт №3	Эксперт №4	Эксперт №5
1	2	3	4	5	6	7
1	Ответственным исполнителям повторно изучить 9МОК-7.5.3-БНС	2 2 2 2	1 2 1 2	2 2 2 1	2 2 2 2	1 1 1 2
2	Исполнителям выполнять требования 9МОК-7.5.3-БНС	2 2 2 2	2 1 2 1	2 2 2 2	2 2 2 1	1 1 1 0
3	Усилить проведение контроля выполнения требований 9МОК-7.5.3-БНС в части идентификации заготовок со стороны мастерского состава	2 2 2 1	1 2 1 2	2 1 1 1	2 2 2 1	1 1 1 1
4	Кладовщице кладовой повторно изучить требования РД57-7.5.1-ОГС «Организация хранения, подготовки, транспортировки и обеспечения цехов сварочными материалами»	2 2 2 2	2 2 2 2	2 1 2 2	2 1 1 1	1 1 1 1
5	Кладовщице кладовой строго соблюдать требования РД57-7.5.1-ОГС в части выдачи сварочных материалов в цех	2 2 2 2	2 1 2 2	2 2 2 1	1 1 1 2	1 1 1 0
6	Ответственным исполнителям повторно изучить 9МОК-7.5.3-БНС	2 2 2 2	2 1 2 1	2 2 2 2	2 2 2 1	1 1 1 0
7	Произвести ревизию продукции (метизы, прокладки), находящейся в кладовой	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 1 1
8	Завести карточки учета типовой межотраслевой формы № М-17	2 2 2 1	2 2 2 2	2 2 2 2	1 2 2 2	2 1 2 1
9	Завести журнал входного контроля сварочных материалов	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 1

1	2	3	4	5	6	7
10	Завести журнал учета материалов в кладовой	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 1
11	Ознакомить исполнителей с технологией	2 2 2 2	2 1 2 1	2 1 2 1	2 1 2 1	1 1 1 0
12	Ответственным за нанесение лакокрасочных покрытий (ЛКП) не наносить ЛКП на детали, имеющие острые кромки, заусенцы	1 1 1 1	2 1 2 0	1 1 1 2	1 1 1 1	0 1 2 0
13	Постоянный контроль со стороны мастерского состава за соблюдением ОТТ 56-09	2 2 2 1	1 1 1 1	1 2 1 2	1 2 1 2	2 1 0 1
14	Организовать контроль состояния воздуха, подаваемого системой на абразивоструйные аппараты, на наличие содержания в нем воды, масла и других жиросодержащих веществ (проверяется до начала абразивоструйной очистки) в соответствии с ASTM D 4285 с регистрацией в журнале	2 2 2 2	2 1 2 1	1 1 1 1	1 2 1 1	0 1 0 2
15	До проведения лакокрасочных работ осуществлять контроль поверхностей, очищенных абразивом, на предмет надлежащей чистоты поверхности и профиля шероховатости на соответствие требованиям ISO 8503-2 или NACE SP 0287 с регистрацией в журнале контроля абразивоструйных и окрасочных работ	2 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1
16	При проведении лакокрасочных работ осуществлять контроль параметров окружающей среды: влажности, температуры, точки росы – с регистрацией в журнале производства и контроля работ по нанесению лакокрасочных покрытий	2 2 2 1	1 1 1 1	2 1 2 1	1 2 1 2	1 0 1 0
17	При проведении лакокрасочных работ осуществлять замеры толщин мокрого слоя (WFT) и сухого слоя (DFT) на соответствие ISO 19840 с регистрацией в журнале производства и контроля работ по нанесению лакокрасочных покрытий	2 1 2 1	1 1 1 1	1 1 1 1	2 0 1 2	0 0 0 1
18	Организовать обучение персонала с последующей сертификацией по уровню 2 NACE или уровню 3 FROSIO (или эквивалентному уровню)	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 1	1 2 1 1
19	Соблюдать требования техпроцесса подготовки под окраску, нанесения покрытия и режимы сушки лакокрасочных материалов ответственными исполнителями	0 2 1 0	0 1 1 1	1 2 1 2	2 2 2 0	2 2 1 0
20	Удалить шлак	1 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 1	2 2 2 1	1 1 1 2
21	Зачистить места подреза, подварить швы	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 1 2 1
22	Зачистить поверхность, применить защитное покрытие марки П1, П2	2 2 1 1	1 1 1 2	2 1 1 1	2 2 2 1	1 1 0 0
23	Усилить контроль за качеством выполнения сварочных работ со стороны группы по сварке	1 1 2 1	0 2 0 2	1 1 1 1	1 1 1 1	0 0 0 1
24	Решить вопрос о депремировании сварщика, нарушившего сварочную технологию, и работников бюро технического контроля (БТК)	2 2 2 2	2 2 2 2	2 2 2 2	2 1 2 1	1 1 1 2

Результаты расчета критерия сигнал/шум

КД / ПД	Оценка эксперта № y_i					$\sum_{i=1}^n y_i$	\bar{y}	$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	D	С/Ш
	1	2	3	4	5					
1	8	6	7	8	5	34	6,80	6,80	1,70	14,35
2	8	6	8	7	3	32	6,40	17,20	4,30	9,79
3	7	6	5	7	4	29	5,80	6,80	1,70	12,96
4	8	8	7	5	4	32	6,40	13,20	3,30	10,94
5	8	7	7	5	3	30	6,00	16,00	4,00	9,54
6	8	6	8	7	3	32	6,40	17,20	4,30	9,79
7	8	8	8	8	6	38	7,60	3,20	0,80	18,59
8	7	8	8	7	6	36	7,20	2,80	0,70	18,70
9	8	8	8	8	7	39	7,80	0,80	0,20	24,83
10	8	8	8	8	7	39	7,80	0,80	0,20	24,83
11	8	6	6	6	3	29	5,80	12,80	3,20	10,22
12	4	5	5	4	3	21	4,20	2,80	0,70	14,01
13	7	4	6	6	4	27	5,40	7,20	1,80	12,10
14	8	6	4	5	3	26	5,20	14,80	3,70	8,64
15	5	4	4	4	4	21	4,20	0,80	0,20	19,45
16	7	4	6	6	2	25	5,00	16,00	4,00	7,96
17	6	4	4	5	1	20	4,00	14,00	3,50	6,60
18	8	8	8	7	5	36	7,20	6,80	1,70	14,84
19	3	3	6	6	5	23	4,60	9,20	2,30	9,64
20	7	8	7	7	5	34	6,80	4,80	1,20	15,86
21	8	8	8	8	6	38	7,60	3,20	0,80	18,59
22	5	5	5	7	2	24	4,80	12,80	3,20	8,57
23	5	4	4	4	1	18	3,60	9,20	2,30	7,51
24	8	8	8	6	5	35	7,00	8,00	2,00	13,89

Из данных, представленных в табл. 4, видно, что предпочтительными способами корректировки производственного процесса изготовления емкостного оборудования по критерию «сигнал/шум» являются следующие мероприятия:

- произвести ревизию продукции (метизы, прокладки), находящейся в кладовой;
- завести карточки учета типовой межотраслевой формы № М-17;
- завести журнал входного контроля сварочных материалов;
- завести журнал учета материалов в кладовой;

– до проведения лакокрасочных работ осуществлять контроль поверхностей, очищенных абразивом, на предмет надлежащей чистоты поверхности и профиля шероховатости на соответствие требованиям ISO 8503-2 или NACE SP 0287 с регистрацией в журнале контроля абразивоструйных и окрасочных работ;

- удалить шлак;
- зачистить места подреза, подварить швы.

Реализация предлагаемых корректирующих и предупреждающих мероприятий в установленный срок позволит избежать возникновения несоответствий в рамках функционирования производственного процесса, а следовательно, минимизировать внутренние и внешние затраты на устранение брака, выполнить заказы в установленные сроки, что, в свою очередь, позволит избежать штрафных санкций за несвоевременную поставку оборудования заказчику.

Повышение уровня качества емкостного оборудования тесно связано с повышением конкурентоспособности продукции и рентабельности предприятия. В связи с этим необходимо постоянно оценивать и анализировать качество выпускаемого емкостного оборудования, в том числе несоответствия, возникающие в процессе его разработки, производства и эксплуатации, а также эффективность разработанных и

реализованных методов корректирующих и предупреждающих действий с применением экспертного метода.

Список литературы

1. Паштова, Л.Г. Актуальные вопросы организации и управления производством на предприятии / Л.Г. Паштова // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №2. – URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_93_Pashtova.pdf_2442.pdf.
2. Тарасов, Р.В. Управление качеством продукции промышленных предприятий: монография / Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова. – Пенза: ПГУАС, 2017. – 168 с.
3. Серебряная, И.А. Разработка процедуры мониторинга результативности процессов системы менеджмента качества / И.А. Серебряная, Е.М. Виноградова, Д.А. Абрамовская // Инженерный вестник Дона. – 2019. – №5. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n5y2019/5901.pdf
4. Анцева, Н.В. Обоснование комбинации методов управления качеством для совершенствования производственных процессов изготовления машиностроительной продукции по критерию «сигнал/шум» / Н.В. Анцева, Н.А. Витчук // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8, №6. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/107EVN616.pdf>.
5. Протасьев, В.Б. Критерии правильности и точности в инструментальном производстве / В.Б. Протасьев, М.А. Анисимова // Стандарты и качество. – 2001. – №4. – С. 59–60.

References

1. Pashtova L.G. Actual issues of organization and production management at the enterprise / L.G. Pashtova // Engineering Bulletin of the Don. – 2014. – №2. – URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_93_Pashtova.pdf_2442.pdf.
2. Tarasov, R.V. Quality management of industrial enterprises: monogr. / R.V. Tarasov, L.V. Makarova. – Penza: PGUAS, 2017. – 168 p.
3. Serebryanaya, I.A. Development of procedures for monitoring the effectiveness of quality management system processes / I.A. Serebryanaya, E.M. Vinogradova, D.A. Abramovskaya // Engineering Bulletin of the Don. – 2019. – №5. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n5y2019/5901.pdf
4. Antseva, N. V. Justification of the combination of quality management methods for improving the production processes of manufacturing engineering products according to the criterion «signal / noise» / N.V. Antseva, N.A. Witchuk // Internet-journal «Science of Science». – 2016. – Vol. 8, no. 6. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/107EVN616.pdf>.
5. Protasyev, V.B. Criteria of correctness and accuracy in tool production / V.B. Protasyev, M.A. Anisimova // Standards and quality. – 2001. – №4. – P. 59–60.

УДК 693.22-044.952:620.193/197

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

Пучков Юрий Михайлович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: puchkovteam@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

Puchkov Yuri Mikhailovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Urban Construction and
Architecture»
E-mail: puchkovteam@yandex.ru

ДЕСТРУКЦИЯ КИРПИЧНЫХ КЛАДОК И ИХ ЗАЩИТА ОТ СОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ

Ю.М. Пучков

Обосновано, что основной деструкции кирпичных кладок является их увлажнение и засоление в сочетании с температурными воздействиями. Описаны соответствующие процессы разрушения. Показано, что морозное разрушение кладок при низких температурах не охватывает всего их объёма. Выявлено, что в засоленных кладках происходят более частые увлажнения, чем в незасоленных, а влажность их всегда больше нормативной в результате увеличения сорбционной способности. Доказано, что солевая коррозия более опасна, чем другие виды деструкции, так как фактор кристаллизационного давления солей действует как при низких, так и при высоких температурах по всему объёму кладки. Выявлена электрофизическая природа увлажнения и засоления кладок. Предложена защита засоленных кирпичных кладок методом объёмного электроосмотического обессоливания. Приведены результаты эксперимента по обессоливанию кирпичных образцов в виде модели главных эффектов и оптимальных значений влияющих факторов.

Ключевые слова: кирпичные кладки, деструкция, капилляры, солевая коррозия, электроосмос, объёмное обессоливание, плотность тока

DESTRUCTION OF BRICK-WALLS AND THEIR PROTECTION AGAINST SALT CORROSION

Yu.M. Puchkov

It is determined that the basis for the destruction of masonry is their moistening and salinization in combination with temperature effects. Corresponding destruction processes are described. It was shown that frosty destruction of masonry at low temperatures does not cover their entire volume. It was revealed that in saline clutches more frequent wetting occurs than in non-saline ones, and their humidity is always higher than standard as a result of increased sorption ability. It is shown that salt corrosion is more dangerous than other types of destruction, since the crystallization pressure factor of salts acts both at low and at high temperatures throughout the entire volume of masonry. The electrophysical nature of the moisture and salinization of clutches was revealed. The saline masonry protection is proposed by the method of volume electroosmotic desalination. The results of an experiment on the desalination of brick samples are presented in the form of a model of the main effects and optimal values of the influencing factors.

Keywords: masonry, destruction, capillaries, salt corrosion, electroosmosis, volumetric desalination, current density

Основой деструкции кирпичных кладок является их увлажнение и засоление в сочетании с температурными воздействиями [1, 2].

Деформации от набухания и усадки создают напряжения, приводящие к образованию малых усадочных трещин, особенно в микрообъёмах (растворных швах) [3]. В увлажнённых кладках при испарении влаги возникают отрицательные (стягиваю-

щие) капиллярные давления, сжимающие скелет материала и вызывающие его усадку. Сорбционная способность засоленных кладок значительно выше, чем незасоленных, из-за снижения критического значения относительной влажности воздуха, соответствующего условиям выпадения конденсата. В присутствии насыщенных растворов солей при $t = +20^\circ\text{C}$ в капиллярах радиусом порядка 10^{-5} м конденсация начинается при относительной влажности воздуха, равной: 75% – для NaCl; 80% – для Na_2SO_4 , а в отсутствие солей – при $\varphi = 96\%$. Следовательно, засоленная кладка увлажняется более часто и разрушается интенсивнее, чем незасоленная.

Переменное нагревание-охлаждение вызывает в кладке деформации и ведёт к образованию микротрещин. Материалы имеют различные коэффициенты теплового линейного расширения, α , $10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$: кирпич – 6; известковый раствор – 9, цементный раствор – 10. Увеличение линейных размеров выражается:

$$\Delta L = \alpha \Delta T L . \quad (1)$$

При нагревании или охлаждении кирпичной кладки на известковом растворе кирпич получит удлинение или укорочение приблизительно на 50%, а на цементном – на 67% меньше, чем растворный шов, что вызовет некоторые физические напряжения в кладке. Чем больше разность температур (ΔT), тем больше деформации (ΔL) и возникающие напряжения. Известно, что южные фасады каменных зданий разрушаются интенсивнее северных.

При отрицательных температурах возможно морозное разрушение кладки. При заполнении материала водой с последующим её замерзанием лёд оказывает давление на стенки пор и разрушает их. Вода имеет плотность 1000 кг/м^3 , а лёд – 917 кг/м^3 , то есть вода при замерзании увеличивает свой объём в 1,09 раза, оставаясь во вмещающем её объёме, и создаёт большие растягивающие напряжения в стенках пор, разрушающие их.

Температура замерзания влаги в капиллярах зависит от их диаметра (Р.Е.Брилинг): чем меньше диаметр, тем ниже температура замерзания воды в капилляре. В капиллярах диаметром 1,57 мм вода замерзает при температуре $-6,4^\circ\text{C}$; в капиллярах диаметром 0,24 мм – при $-14,2^\circ\text{C}$, а диаметром 0,1 мм – при $-18,6^\circ\text{C}$. В связи с этим полного замерзания влаги, находящейся в кирпичной кладке, обычно не происходит.

Для определения количества незамёрзшей влаги в строительных материалах в зависимости от температуры и влажности материала Ю.Д. Ясиным предложена эмпирическая формула:

$$\omega' = a + b \omega_B + \frac{c\omega_B + d}{t} , \quad (2)$$

где ω_B – весовая влажность материала, %; ω' – весовая влажность материала, отнесённая к незамёрзшей в нём влаге, %; t – температура материала, $^\circ\text{C}$; a, b, c, d – эмпирические коэффициенты.

Для кирпича красного, $\gamma=1690 \text{ кг/м}^3$: $a=0,18$; $b=0$; $c=-0,93$; $d=-2,64$.

Для цементно-песчаного раствора 1:4, $\gamma=1690 \text{ кг/м}^3$: $a=2,2$; $b=0,25$; $c=-1,2$; $d=1,92$.

При повышенной влажности кирпичной кладки $\omega_B = 8\%$, минимальной для старинных построек (норма 1–2%), по Ю.Д. Ясину, количество незамёрзшей влаги при температуре $-12,2^\circ\text{C}$ (средняя за январь, характерная для средней полосы России) $\omega' = 1,1\%$. Количество замёрзшей влаги: $8 - 1,1 = 6,9\%$, что составит 86% всей влаги, содержащейся в кирпиче.

Для цементно-песчаного раствора этой же кладки при $\omega_B = 8\%$ (норма 2–4%): количество незамёрзшей влаги при температуре $-12,2^\circ\text{C}$ $\omega' = 4,8\%$, количество замёрзшей влаги $8 - 4,8 = 3,2\%$, что составляет 40 % всей влаги, содержащейся в кладочном растворе.

Если влага, содержащаяся в кладке, имеет растворимые соли, то её замерзание даже в широких трещинах и полостях происходит при температурах ниже 0°C. Вода солёностью 1,8% замерзает в открытом сосуде при температуре – 1,9°C, а насыщенный раствор хлорида натрия – при температуре ниже минус 20.

Таким образом, влага, содержащаяся в кирпичной кладке, не замерзает вся, а если кладка засолена, то она ещё менее подвержена морозной деструкции.

Распределение температур в толще наружной стены отапливаемого здания описывается выражением

$$\tau_x = t_{int} - \frac{t_{int} - t_{ext}}{R_o} \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + \sum (n-1) R_x \right). \quad (3)$$

Расчёты показывают, что для кирпичной кладки стены толщиной 0,51 м, влажностью $\omega=8\%$ при температурах внутри и снаружи здания соответственно $t_{int}=+20^\circ\text{C}$ и $t_{ext}=-12,2^\circ\text{C}$, с низким сопротивлением теплопередаче $R_o = 0,48 \frac{\text{M}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$, слой с температурой $\tau_x = 0^\circ\text{C}$ будет располагаться на расстоянии 0,29 м от внутренней поверхности, то есть 57% объёма кладки будет находиться в зоне положительных температур. Следовательно, в отапливаемых зданиях незамёрзшей оказывается ещё большая доля от всей влаги, содержащейся в кладке, а с наибольшей вероятностью морозному разрушению подвергаются только наружные слои, а не весь объём кладки.

Природные воды представляют собой растворы с различной степенью минерализации (электролиты). Увлажнение и засоление каменных кладок происходит благодаря капиллярным явлениям и имеет *электрофизическую природу*. Поскольку каменные материалы и электролиты имеют различные диэлектрические постоянные, ϵ , на границе стенка капилляра – поровый раствор происходит разделение заряда. При этом раствор (большая ϵ , проводник) заряжается положительно, а стенка капилляра (небольшая ϵ , изолятор) – отрицательно. На границе раздела фаз, таким образом, появляется электрический дзета-потенциал (ζ). Чем меньше разница значений ϵ раствора и материала, тем лучше смачивание и больше капиллярный эффект [4,5].

Значения некоторых диэлектрических постоянных при различной минерализации воды: сухой кирпич, $\epsilon = 20 - 100$; чистая вода, $\epsilon = 200$; влага в стене, $\epsilon = 1000$; солёная вода, $\epsilon = 2000$; сухой воздух, $\epsilon = 1$. У пары вода – кирпич краевой угол смачивания небольшой ($10 - 50^\circ$), то есть смачивание хорошее.

Наличие ζ -потенциала на границе капилляр – раствор является причиной поверхностного натяжения жидкости. Чем тоньше капилляр, тем больше сказывается поверхностное натяжение и выше капиллярное поднятие порового раствора, h :

$$h = \frac{2\sigma}{\rho_\omega g r} \cos \theta. \quad (4)$$

Наибольший эффект обеспечивается капиллярами радиусом $r = 10^{-4} - 10^{-7}$ м, которые в структуре кирпича или кладочного раствора занимают 20–50%. Теоретически жидкость с поверхностным натяжением $\sigma = 0,073 \text{ Н/м}$, углом смачивания пары жидкость – кирпич $\theta = 10^\circ$, плотностью $\rho_\omega = 1000 \text{ кг/м}^3$ может подняться на высоту более 10 м. На практике эта величина ближе к 2,5-5 м.

Распределение влаги и солей по объёму кирпичной кладки неравномерно и является функцией времени, а их значения по массе находятся в пределах от 1 до 16 % (Мостовая башня, XVII в., Измайловский остров, г. Москва).

Капиллярные явления – главный фактор накопления солей в порах материалов, которые при изменениях температуры и влажности становятся причиной деструкции кладок. Одной из важных характеристик солевой деструкции является кристаллиза-

сионное давление. Определены *удельные давления*, вызванные кристаллизацией солей, для растворов, МПа: $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 0,44$; $\text{MgSO}_4 - 0,36$; $\text{NaCl} - 0,27$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 0,21$ и др. Кроме того, в диапазоне температур от -10°C до $+30^\circ\text{C}$ устойчивыми формами этих солей являются и их кристаллогидраты: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{MgSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$; $\text{NaCl} \times 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$, а также кристаллогидраты других солей [3].

При присоединении безводными солями воды, сопровождающемся образованием кристаллогидратов, объём твёрдой фазы увеличивается. Это является причиной возникновения больших давлений в порах кладок, содержащих растворы солей. Кристаллизационное давление в порах возникает тогда, когда объём находящихся в них кристаллогидратов превысит объём пор. При переходе сульфата натрия Na_2SO_4 в кристаллогидрат $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$ его объём возрастает на 311%, а переход Na_2CO_3 в кристаллогидрат $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$ сопровождается увеличением объёма всего на 148%, что объясняет сравнительно меньшее кристаллизационное давление, оказываемое этой солью.

Засолённые кирпичные кладки в результате кристаллизационного давления солей подвергаются деструкции, утрачивают прочность и могут обрушаться (см. рисунок).



Обрушение засолённой стены под действием бокового давления грунта из-за солевой коррозии кладочного раствора (г. Пенза, бывший Мясной пассаж, постройка XIX в.)

Солевая коррозия происходит во всём объёме кладки и в широком диапазоне положительных и отрицательных температур в отличие от морозного разрушения, которое в отапливаемых зданиях даже при очень низких температурах касается только поверхностных слоёв. По этой причине солевая деструкция опаснее морозной. Морозную деструкцию можно ограничить известным методом гидроизоляции. Защита каменных кладок от солевой коррозии не имеет такого простого решения.

Метод поверхностного обессоливания не позволяет решить проблему, так как постоянное испарение влаги с поверхности камня компенсируется её притоком из внутренних частей кладки, куда она попадает вследствие капиллярного подсоса соледержащих природных вод (В.Я. Степанов, К.П. Флоренский, М.В. Рудько).

Для защиты каменных кладок от солевой коррозии предлагается *метод объёмного обессоливания* на основе электроосмоса.

Перенос жидкости в капилляре под действием постоянного электрического тока обусловливается разделением зарядов на границе двух фаз и образованием двойного электрического слоя (ζ -потенциал). В результате электролитической диссоциации положительные ионы собираются вблизи отрицательно заряженной стенки капилляра, в то время как в середине капилляра плотность этих зарядов уменьшается. В целом раствор остаётся электрически нейтральным. Если приложить к капилляру постоянное напряжение, то положительные ионы будут двигаться к отрицательному полюсу источника тока, при этом в движение втягиваются молекулы воды в силу их дипольных свойств.

Известно, что перенос жидкости в капилляре осуществляется под действием силы F (Tenge Hans W., ФРГ):

$$F = CU\zeta, \text{ Н}, \quad (5)$$

где C – электрическая ёмкость капилляра, Ф; U – приложенное постоянное напряжение, В; ζ – дзета-потенциал, В.

Электрическая ёмкость капилляра определяется по аналогии с ёмкостью коаксиального кабеля:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{rl}{\Delta r}, \text{ Ф}, \quad (6)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{м}}$; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости (безразмерная величина); r – радиус слоя положительных зарядов в капилляре, м; l – длина капилляра, м; Δr – расстояние подвижных положительных зарядов жидкости от отрицательно заряженной стенки капилляра, м.

Скорость движущейся в капилляре жидкости:

$$v = \frac{I\epsilon_0\zeta}{4\pi\eta\kappa}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (7)$$

где I – сила тока, А; ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{м}}$;

ζ – дзета-потенциал, В; η – вязкость жидкости, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$; κ – электрическая проводимость жидкости, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Скорость движения раствора в капилляре тем выше, чем меньше κ , то есть чем более разбавленным является раствор. Следовательно, по мере обессоливания кладки при её постоянном увлажнении водой процесс электроосмоса прогрессирует.

Процесс электроосмоса может протекать в узких капиллярах радиусом менее 10^{-5} м. В таких капиллярах раствор имеет очень тонкий слой свободной жидкости, легко вовлекаемый положительными ионами в электроосмотическое движение. В более широких капиллярах ионы свободной жидкости перемещаются к соответствующим электродам по законам электролиза Фарадея.

При наличии в межэлектродном пространстве капиллярно-пористого материала у анода и катода происходит накопление продуктов электролиза (соответственно кислоты и щёлочи), диффузия которых в глубь раствора осложняется наличием материала (явление диализа).

Таким образом, при действии постоянного тока на капиллярно-пористую систему, заполненную раствором солей, имеет место одновременное протекание электроосмоса, электролиза и диализа с их взаимным влиянием, но в зависимости от сочетания различных факторов превалирует тот или иной процесс. Подобрать определённые зна-

чения внешних электрических параметров, можно добиться преобладания электроосмоса.

С этой целью для лабораторных исследований по плану эксперимента $3^3 \times 2 // 9$ и последующей обработки данных из 156 были отобраны 36 образцов кирпича размерами $6,2 \times 6,2 \times 25,0$ см. Искусственное засоление их производилось по методике раствором NaCl известной концентрации на уровнях 0,5%, 2,0% и 3,5% по массе. Обессоливание осуществлялось с помощью специально разработанных электрических установок, автоматически поддерживающих плотность тока по сечению образцов на уровнях $0,007 \text{ мА/см}^2$, $0,070 \text{ мА/см}^2$, $0,133 \text{ мА/см}^2$. Продолжительность обессоливания варьировалась на трёх уровнях: 5, 10 и 15 суток, а водопоглощение образцов – на двух: 14 и 17% по массе. Электроды (анод и катод), представляющие собой гнутый контур из свинца шириной 0,5 см, через тканевый трикотажный фитиль шириной 1 см обжимали образец. Благодаря капиллярным свойствам фитиля, вода транспортировалась из питающего резервуара в резервуар для сбора фильтрата через приэлектродную зону, обеспечивая электрический контакт катода с образцом. С целью исключения подтекания воды по стенкам образца подача её в прианодную зону была ограничена таким образом, чтобы вся подаваемая вода впитывалась в образец. Анод из крайнего верхнего положения вместе с фитилём через $1/5$ часть времени обессоливания переставлялся вниз на $1/5$ часть высоты образца. Катод при этом постоянно находился в нижнем крайнем положении. Таким образом, на 5-суточном образце анод переставлялся 1 раз в сутки, на 10-суточном – 1 раз в 2 суток, а на 15-суточном – 1 раз в 3 суток.

По окончании запланированного времени обессоливания каждый образец разделялся на пять равных частей в соответствии с положениями, занимаемыми анодом, и анализировался на остаточное солесодержание по зонам. Химический анализ на ион хлора проводился по методике реставрационных организаций титрованием аликвоты водной вытяжки раствором азотнокислого серебра (концентрация 0,01 Н) в присутствии хромата калия.

Уровень обессоливания определялся по величине относительного изменения исходного солесодержания:

$$Y = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{ост}}}{C_{\text{исх}}} 100\%, \quad (8)$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходное солесодержание образца, % по массе; $C_{\text{ост}}$ – остаточное содержание соли в образце после обработки током, % по массе.

Всего было проведено 9 опытов с обессоливанием 4 образцов в каждом опыте и варьированием факторов в соответствии с планом.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить модель главных эффектов:

$$y = 28,55 + 7,09x_1 - 17,64x_1^2 + 29,01x_2^2 - 8,91x_3^2 + 9,88x_4, \quad (9)$$

где y – общая доля обессоливания; кодированные значения варьируемых факторов: x_1 – плотность тока по сечению образца на трёх уровнях (-1; 0; 1); x_2 – продолжительность обессоливания на трёх уровнях (-1; 0; 1); x_3 – исходное солесодержание образца на трёх уровнях (-1; 0; 1); x_4 – водопоглощение образца на двух уровнях (-1; -; 2).

На основе математической модели получены оптимальные натуральные значения влияющих факторов (см. таблицу).

Оптимальные натуральные значения факторов, влияющих на процесс обессоливания
(в среднем по образцам)

Факторы			
Плотность тока по сечению образца, мА/см ²	Продолжительность обработки, сут	Исходное солесодержание, % по массе	Водопоглощение образца, % по массе
0,09	15	2,00	17,7

Из таблицы видно, что наиболее эффективно процесс электроосмотического объёмного обессоливания протекает при максимальных значениях продолжительности обработки током и водопоглощения кирпичного образца при оптимальной плотности тока 0,09 мА/ см².

ВЫВОДЫ

1. Наиболее влияющим фактором деструкции кирпичных кладок является солевой, увеличивающий и учащающий увлажнение, обеспечивающий кристаллизационное давление и разрушающий структуру материала в широком диапазоне температур – от низких отрицательных до высоких положительных.

2. Увлажнение и засоление по всему объёму кладок имеет электрофизическую природу и основано на разделении электрических зарядов на границе раздела фаз стенка капилляра – солевой раствор.

3. Объёмное обессоливание может быть реализовано через электроосмотический процесс при оптимальной плотности тока по сечению кладки, равной 0,09 мА/см².

Список литературы

1. Белановская, Е.В. Защита кирпичной кладки памятников архитектуры от коррозии / Е.В. Белановская // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – Т.2, №1. – С. 7–9.
2. Пучков, Ю.М. Процессы в засоленных каменных конструкциях / Ю.М. Пучков // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2018. – №3 (16). – С.237–243.
3. Инчик, В.В. Эрозия и коррозия кирпичной кладки / В.В. Инчик // Вестник гражданских инженеров. – 2004. – №1. – С. 92–98.
4. Пучков, Ю.М. Каменные мосты и солевая форма коррозии / Ю.М. Пучков // Дороги и мосты. – 2018. – Вып. 39/1. – С. 242–256.
5. Пучков, Ю.М. Долговечность каменных памятников архитектуры: монография / Ю.М. Пучков. – Пенза, 2015. – 129 с.

References

1. Belanovskaya, E.V. Protection of brickwork of architectural monuments from corrosion / E.V. Belanovskaya // Bulletin of the Cherepovets State University. – 2013. – Vol.2, No. 1. – P. 7–9.
2. Puchkov, Yu.M. Processes in saline stone structures / Yu.M. Puchkov // Education and science in the modern world. Innovations. – 2018. – №. 3 (16). – P.237–243.
3. Inchik, V.V. Erosion and corrosion of masonry / V.V. Inchik // Bulletin of civil engineers. – 2004. – No. 1. – P. 92–98.
4. Puchkov, Yu.M. Stone bridges and salt form of corrosion / Yu.M. Puchkov // ROADS AND BRIDGES. – 2018. – Vol. 39/1. – P. 242–256.
5. Puchkov, Yu.M. Durability of stone monuments of architecture: monograph/ Yu.M. Puchkov. – Penza, 2015. – 129 p.

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

Очкина Наталья Александровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Физика и химия»
E-mail: ochkina.natalya@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

Ochkina Natalya Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ С ВЫСОКОПЛОТНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Н.А. Очкина

Проведено дилатометрическое исследование относительной линейной деформации и определено среднее значение коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) композитов на основе высокоглиноземистого цемента (ВГЦ) с высокоплотным наполнителем (полиминеральный отход стекольной промышленности (ПМО)) в интервале температур от 20 до 400 °С. Установлено влияние степени наполнения на характер изменения и величину температурных деформаций композитов. Изучено изменение прочности, модуля упругости и теплопроводности композитов при нагревании.

Ключевые слова: композит, высокоплотный наполнитель, ВГЦ, термические деформации, КЛТР, степень наполнения, прочность, модуль упругости, теплопроводность

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF COMPOSITES WITH HIGH-DENSITY FILLER

N.A. Ochkina

The dilatometric study of the relative linear deformation was performed and the average value of the coefficient of linear temperature expansion (CLTR) of composites based on high-alumina cement (HAC) with a high-density filler (polyminerall waste of the glass industry (PMW)) was determined in the temperature range from 20 to 400°C. The influence of the degree of filling on the nature of changes and the value of temperature deformations of composites is established. Changes in the strength, modulus of elasticity and thermal conductivity of composites during heating are studied.

Keywords: composite, high-density filler, high-alumina cement, thermal deformations, CLTR, degree of filling, strength, modulus of elasticity, thermal conductivity

В процессе эксплуатации в конструкциях радиационной защиты происходит интенсивное выделение энергии, что приводит к их нагреву до 350°C [1]. При таком повышении температуры на границе компонентов высокоплотного композита возникают температурные напряжения, зависящие от таких факторов, как термическое расширение или усадка составляющих компонентов, температура и скорость нагрева, упругопластические свойства и предельные деформации составляющих компонентов, относительное количество компонента, претерпевающего усадку при нагревании, зерновой состав и максимальная крупность зерен наполнителя [2]. При значительных напряжениях и недостаточном сцеплении вяжущего с поверхностью наполнителя у этих границ легко возникают трещины, приводящие к нарушению структуры и в дальнейшем к разрушению материала. Необходимым условием сохранения высоких физико-механических свойств композита под воздействием температуры является равенство КЛТР вяжущего и наполнителя. Поэтому для конструкций, работающих в условиях повышенных и высоких температур, важно знать КЛТР и относительные линейные деформации.

Для определения КЛТР композитов на основе ВГЦ и изучения влияния на его величину различных модифицирующих добавок и степени наполнения был применен дилатометрический метод. Исследованию в интервале температур от 20 до 400 °С были подвергнуты образцы композитов трех составов: К-1 с относительным объемным содержанием заполнителя $\vartheta_f = 0,19$; К-2 – $\vartheta_f = 0,32$; К-3 – $\vartheta_f = 0,42$, а также образцы цементного камня, приготовленного на основе ВГЦ с В/Ц=0,5, которые выдерживали в нормальных условиях в течение 3 сут, а затем в воздушно-сухих условиях – 25 сут. Образцы серии Ц-1 не содержали добавки и являлись контрольными; остальные образцы содержали добавку, введенную в процессе изготовления: образцы серии Ц-2 – 0,5% суперпластификатора С-3, а образцы серии Ц-3 – 1% карбамидной смолы (от массы цемента).

Выбор в качестве вяжущего ВГЦ обусловлен тем, что он характеризуется высокой плотностью, быстрым набором прочности и стойкостью к воздействию агрессивных сред. Способность ВГЦ связывать при гидратации 30...45% (по весу) воды делает его надежным материалом для защиты от нейтронного излучения.

В качестве мелкодисперсного заполнителя использовали ПМО (средняя плотность 5100 кг/м³, содержание PbO – до 71%).

Результаты экспериментального определения продольных и поперечных размеров и массы исследуемых образцов после нагревания, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что цементный камень на основе ВГЦ дает довольно большую температурную усадку. Изменения размеров образцов возрастают с увеличением температуры нагревания. Добавка суперпластификатора С-3 не приводит к существенному изменению величины усадки. При сушке образцов с добавкой карбамидной смолы усадка их уменьшается в 2,57 раза, а при нагревании до 400°С – на 23,94 %.

Т а б л и ц а 1

№ серии	Исходная масса образца, г	Потери массы образцов, %		Исходная длина образца, мм	Продольная линейная усадка, %		Исходный диаметр образца, мм	Поперечная линейная усадка, %	
		После сушки при 110°С (3 часа)	После термообработки в печи дилатометра (при 400°С)		После сушки при 110°С (3 часа)	После термообработки в печи дилатометра		После сушки при 110°С (3 часа)	После термообработки в печи дилатометра (при 400°С)
Ц-1	2,36	10,02	22,07	49,68	0,36	2,64	5,06	0,071	0,517
Ц-2	2,25	9,893	22,44	49,70	0,33	2,60	5,04	0,074	0,425
Ц-3	2,25	10,06	22,71	49,66	0,14	2,13	5,02	0,019	0,246
К-1	3,38	5,33	9,38	50,32	0,20	0,79	5,07	1,023	0,369
К-2	3,45	3,48	7,45	50,32	0,18	0,74	5,07	0,087	0,437
К-3	3,42	3,51	6,46	50,43	0,12	0,69	5,07	0,018	0,211

В процессе сушки при 100...110 °С образцы теряют гигроскопическую влагу. Поскольку все образцы цементного камня имеют одинаковое водоцементное отношение, то потери массы их в процессе сушки примерно одинаковы и составляют в среднем около 10%.

При дальнейшем повышении температуры из цементного камня удаляется кристаллизационная вода. При этом у модифицированного цементного камня потери массы незначительно выше, чем у немодифицированного. Очевидно, это можно

объяснить ошибками, возникающими в процессе проведения эксперимента, а также частичной температурной деструкцией органических добавок и удалением продуктов этого процесса из образцов.

Исследуемые композиты имеют бóльшие деформации расширения и значительно меньшие деформации усадки, чем цементный камень (рис. 1).

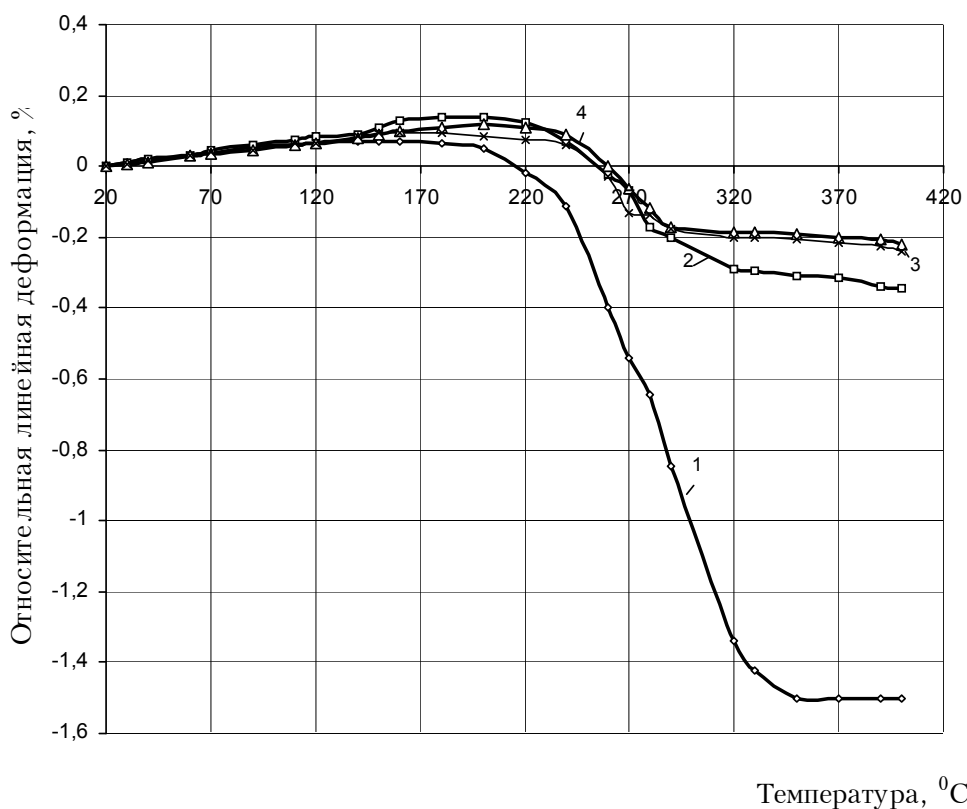


Рис. 1. Относительные линейные деформации при нагреве:
 1 – цементного камня после высушивания при 100...110°C;
 2 – композита со степенью наполнения $\vartheta_f = 0,19$;
 3 – то же с $\vartheta_f = 0,32$; 4 – то же с $\vartheta_f = 0,42$

При нагреве до 400°C относительная линейная усадка композита с $\vartheta_f = 0,19$ на 320%, с $\vartheta_f = 0,32$ на 530% и с $\vartheta_f = 0,42$ на 660% меньше по сравнению с усадкой цементного камня. Кроме того, у композитов период температурного расширения продолжительнее, чем у цементного камня.

Среднее значение КЛТР в интервале температур 20-200°C для образцов цементного камня без добавок и с добавками, высушенных до удаления гигроскопической влаги, рассчитанное по экспериментальным данным, равно $6,6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

Введение заполнителя приводит к изменению КЛТР материала. Используемый в качестве заполнителя ПМО в интервале температур от -60 до 300°C имеет КЛТР, равный $(7,5-8,7) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Среднее значение КЛТР для ПМО составляет $8,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [3]. Оно больше, чем у ВГЦ, поэтому, как показал анализ экспериментальных данных, при увеличении количества заполнителя наблюдается увеличение КЛТР от $6,43 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ до $7,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, то есть примерно на 16,6%. Аналитически эта зависимость может быть описана уравнением

$$\alpha_p \cdot 10^6 = 1,6259\vartheta_f^2 + 0,1647\vartheta_f + 6,44,$$

где α_p – коэффициент линейного температурного расширения; ϑ_f – объемная степень наполнения композита.

Зависимость величины КЛТР от температуры имеет сложный характер (рис. 2).

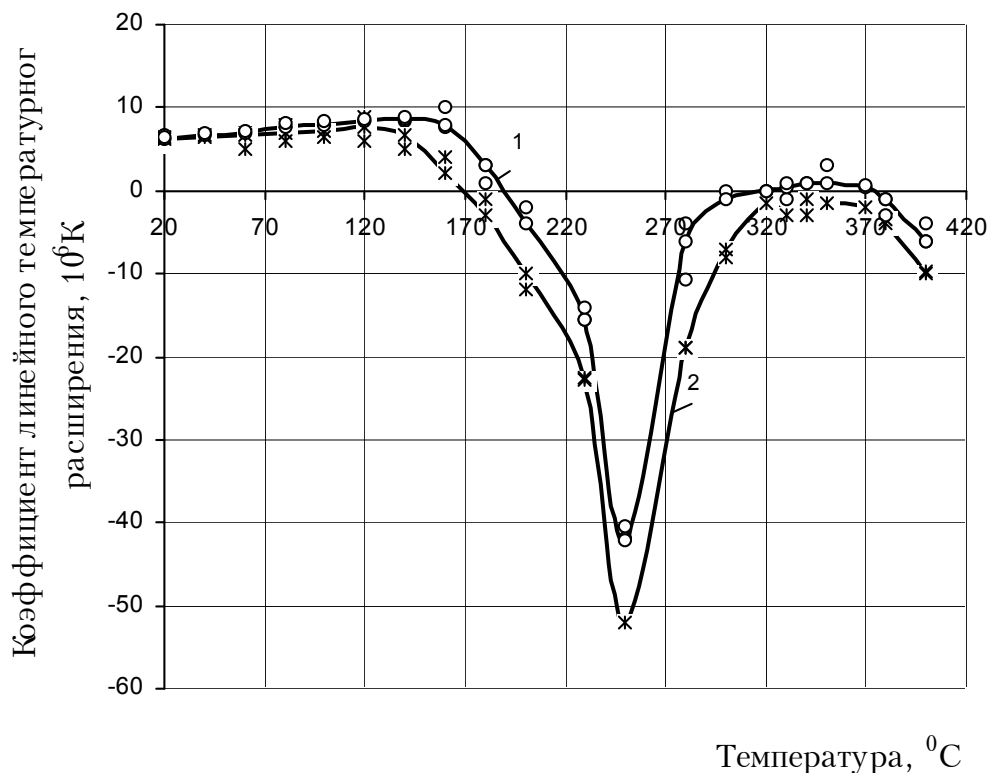


Рис. 2. КЛТР при нагреве:
1 – при объемном содержании заполнителя $\vartheta_f = 0,19$; 2 – при $\vartheta_f = 0,42$

Нагревание до 130°C характеризуется незначительным изменением величины КЛТР. При дальнейшем повышении температуры до 260°C КЛТР композитов уменьшается. Это свидетельствует об интенсивной потере влаги образцами и их усадке. В интервале температур 170-185°C изменяется знак КЛТР, а в интервале от 250 до 330°C наблюдается рост КЛТР. Это можно объяснить расширением частично обезвоженных образцов. При нагреве выше 330-340°C величина КЛТР незначительно уменьшается. У композитов с большим содержанием цемента наблюдается более выраженная зависимость КЛТР от температуры. При нагревании исследуемых образцов композитов в диапазоне температур от 0 до 400°C происходят два противоположно направленных процесса – усадка цементного камня, обусловленная его дегидратацией, и термическое расширение безводных компонентов: заполнителя и негидратированных зерен цемента.

Характер изменения прочности композитов при нагревании до 400°C показан на рис. 3, 4.

Предел прочности на растяжение при изгибе возрастает при нагреве до 100°C, затем резко падает. В интервале температур от 200°C до 400°C падение прочности замедляется. Прочность при сжатии начинает падать сразу же. В результате дегидратации алюминатов кальция в интервале температур 100...400°C остаточная прочность при 400°C составляет 44—47% от прочности образцов, высушенных при 110°C.

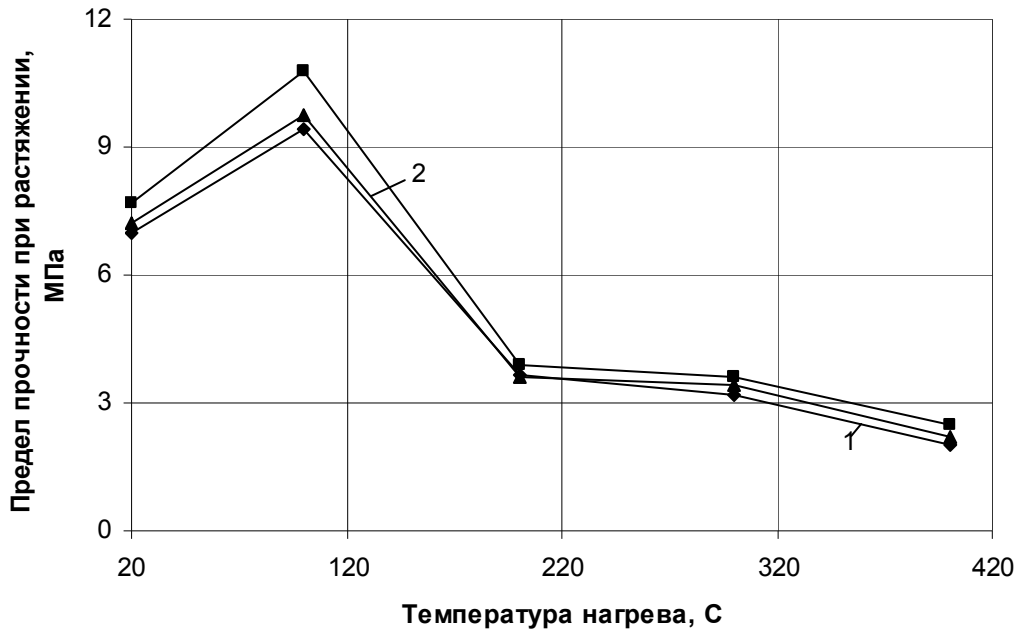


Рис. 3. Изменение предела прочности на растяжение при изгибе при нагревании до 400°С:
 1 – композита со степенью наполнения $\vartheta_f = 0,19$;
 2 – то же с $\vartheta_f = 0,32$; 2 – то же с $\vartheta_f = 0,42$

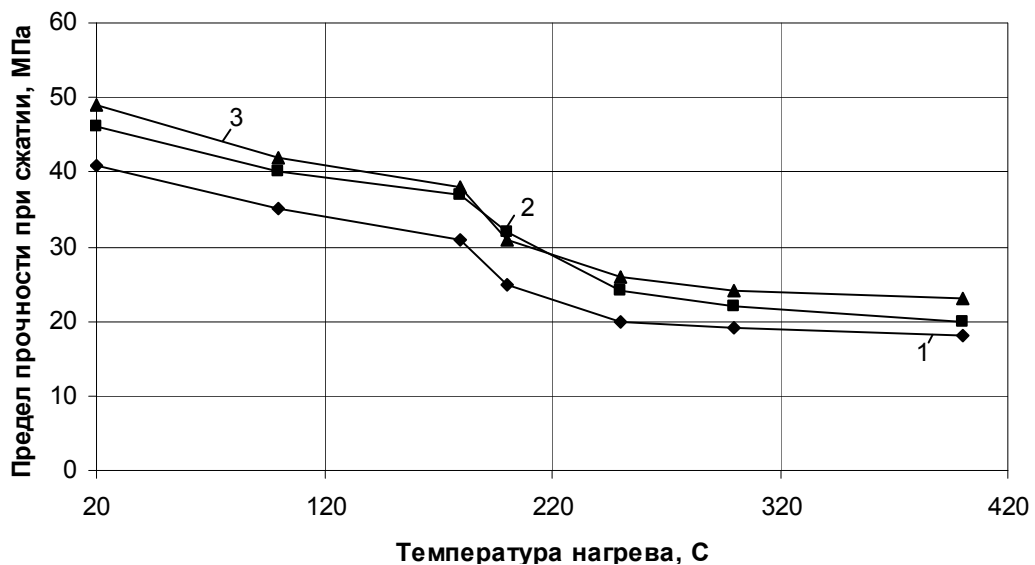


Рис. 4. Изменение предела прочности при сжатии при нагревании до 400°С:
 1 – композита со степенью наполнения $\vartheta_f = 0,19$;
 2 – то же с $\vartheta_f = 0,32$; 2 – то же с $\vartheta_f = 0,42$

На рис. 5 показано изменение модуля упругости, определенного ультразвуковым методом в зависимости от температуры, для композита со степенью наполнения $\vartheta_f = 0,42$. Как видно, в диапазоне температур от 150 до 350°С происходит резкое снижение модуля упругости в результате дегидратации алюминатов кальция цемента. В этом температурном диапазоне наблюдается также небольшое уменьшение термического расширения.

При длительном облучении защитных экранов их температура повышается до тех пор, пока отводимая посредством теплопроводности или конвекции тепловая энергия не будет равна количеству энергии, передаваемой излучением. Снизить температуру в

защитных экранах можно уменьшением количества выделяемого тепла на входе в бетонную защиту посредством устройства перед ней дополнительной тепловой защиты из стали, воды и других материалов, эффективно поглощающих энергию частиц, а также применением материала с большой теплопроводностью. Кроме того, высокая теплопроводность и большая удельная теплоемкость материала в сочетании с малым тепловым расширением, малой усадкой и большой прочностью на разрыв обеспечивают уменьшение температурных напряжений, приводящих к образованию трещин.

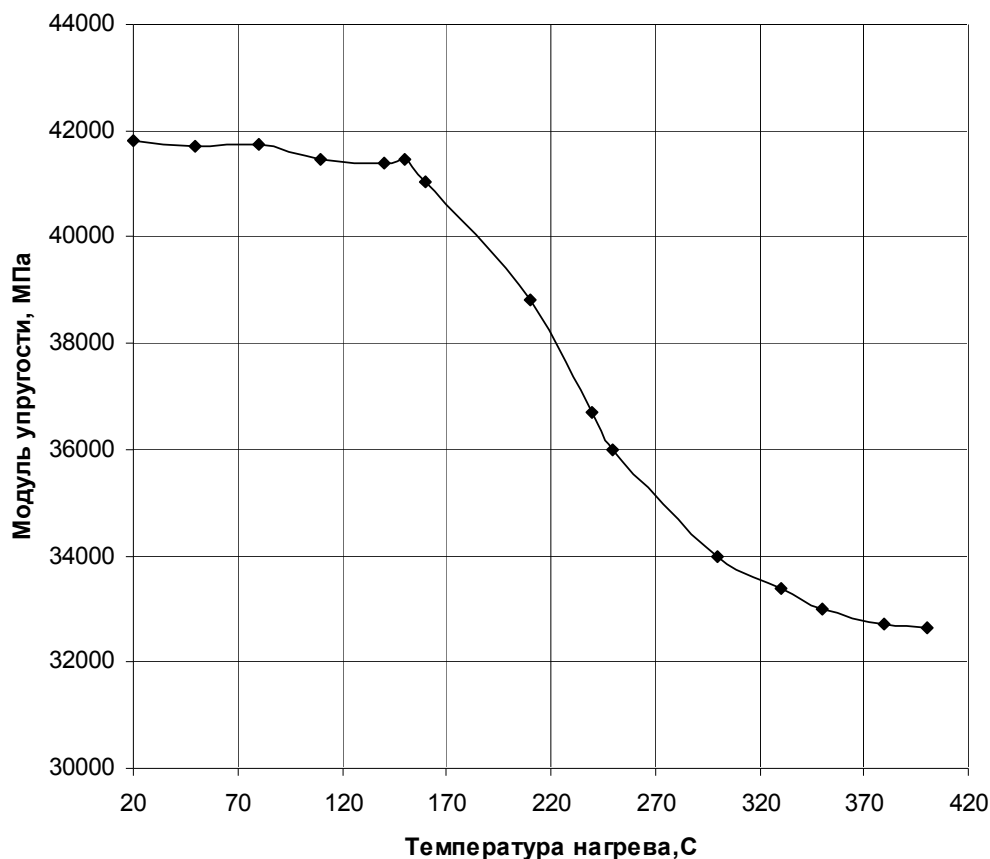


Рис. 5. Изменение модуля упругости при нагревании до 400°С композита со степенью наполнения $\vartheta_f = 0,42$

Основными факторами, влияющими на теплопроводность композита, являются: вид, содержание и теплопроводность цемента; расход воды затворения; вид и теплопроводность заполнителя; плотность композита; условия твердения и возраст бетона. Использование различных методов теории теплопроводности с учетом имеющихся экспериментальных данных дает возможность получить эмпирические зависимости, которые позволяют с достоверностью определять значения теплофизических показателей материала. Рядом ученых: В.С. Грызловым, В.Г. Довжик, К. Лихтенеккер, А. Миснар, В.И. Одолевским – разработаны формулы для расчета теплопроводности бинарных строительных материалов с неупорядоченным распределением компонентов [4]. Различия в значениях теплопроводности, рассчитанных по приведенным формулам, незначительны. Однако расхождения с экспериментальными значениями могут достигать 30...40%. Это объясняется стохастическим реальным распределением частиц заполнителя в матрице вяжущего материала. В этом случае на величину теплопроводности большое влияние оказывает вероятностный фактор. Приведенные расчетные формулы не учитывают влияния на величину теплопроводности общей пористости материала, а также характера пор. Кроме того, отсутствие четких модельных представлений о теплопереносе в композиционных материалах делает необходимым проведение экспериментальных исследований по определению теплофизических характеристик.

Определение коэффициента теплопроводности исследуемых композитов проводили на образцах, высушенных до постоянной массы, с помощью электронного измерителя теплопроводности ИТП-МГ 4. Коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость изменения температуры вещества в нестационарных тепловых процессах, рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho},$$

где λ – теплопроводность; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала.

Результаты проведенных исследований приведены в табл.2.

Т а б л и ц а 2

№ состава	$\frac{B}{Ц}$	ϑ_f	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	α , м ² /с
1	0,5	0,59	0,468	1187	$10 \cdot 10^{-8}$
2	0,5	0,66	0,490	1054	$11,5 \cdot 10^{-8}$
3	0,5	0,70	0,509	958	$14,1 \cdot 10^{-8}$
4	0,55	0,57	0,464	1261	$9,4 \cdot 10^{-8}$
5	0,55	0,64	0,486	1119	$10,7 \cdot 10^{-8}$
6	0,55	0,69	0,501	1016	$12,2 \cdot 10^{-8}$
7	0,6	0,56	0,460	1330	$9,3 \cdot 10^{-8}$
8	0,6	0,63	0,482	1180	$10,5 \cdot 10^{-8}$
9	0,6	0,68	0,499	1071	$11,7 \cdot 10^{-8}$

Как видно из табл. 2, при повышении степени наполнения композитов коэффициент теплопроводности λ_K увеличивается. Это можно объяснить тем, что коэффициент теплопроводности заполнителя из ПМО λ_3 равен 0,62 Вт/(м·К) [3], а экспериментально определенное значение коэффициента теплопроводности $\lambda_{ц}$ цементного камня из ВГЦ – 0,314 Вт/(м·К). Поскольку $\lambda_3 > \lambda_{ц}$, то увеличение объемного содержания наполнителя приводит к повышению λ_K .

Увеличение водоцементного отношения приводит к закономерному снижению коэффициента теплопроводности (рис. 6). Причем влияние В/Ц тем заметнее, чем меньше степень наполнения материала.

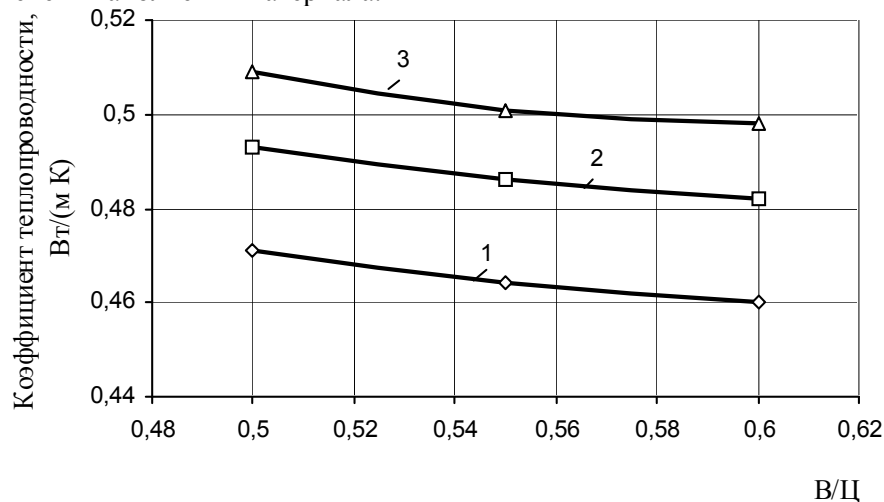


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности от В/Ц:

1 – композита со степенью наполнения $\vartheta_f = 0,59$;

2 – то же с $\vartheta_f = 0,66$; 2 – то же с $\vartheta_f = 0,7$

Из табл. 2 также видно, что исследуемые композиты обладают достаточно высокой удельной теплоемкостью, сравнимой с значениями этой величины для традиционных бетонов, применяемых для защиты от радиационных излучений.

Результаты исследования зависимости теплопроводности от температуры, проведенного на образцах со степенью наполнения $\vartheta_f = 0,57$ (состав №1) и $\vartheta_f = 0,66$ (состав №2) при В/Ц = 0,5 приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

№ состава	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при средней температуре нагрева, °С					
	50	100	150	200	250	300
1	0,505	0,517	0,531	0,552	0,579	0,598
2	0,528	0,534	0,547	0,562	0,584	0,601

Анализ экспериментальных данных показывает, что при повышении температуры композитов теплопроводность возрастает. При нагревании до 300°С теплопроводность увеличивается на 10,4...13,8%.

Список литературы

1. Болтышев, С.А. Серные бетоны для защиты от радиации: моногр. / С.А. Болтышев, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 174 с.
2. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев; М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – М.: МГСУ, 2012, – 432 с.
3. Аппен, А.А. Справочник. Стекло / А.А. Аппен, М.С. Асланова, Н.М. Амосов [и др.]; под ред. Н.М. Павлушкина. – М.: Стройиздат. 1986. – 487 с.
4. Прошин, А.П. Строительные растворы для защиты от радиации / А.П. Прошин, Е.В. Королев, Н.А. Очкина, С.М. Саденко; под общ. ред. проф. А.П. Прошина. – Пенза: ПГАСА, 2002. – 202 с.

References

1. Boltyshev, S.A. Sulphur concretes for protection against radiation: monograph / S. A. Boltyshev, A. M. Danilov, E. V. Korolev. – Penza: PGUAS, 2014. – 174 p.
2. Bazhenov, Yu. M. Systems analysis in construction materials science: monograph / Yu. M. Bazhenov, I. A. Garkina, A. M. Danilov, E. V. Korolev; Education and Science Ministry of Russian. Federation, FGBOU VPO «Moscow State University of Civil Engineering». – М.: MGSU, 2012. – 432 p.
3. Appenin, A. A. Guide. Glass / A. A. Appenin, M. S. Aslanova, N. M. Amosov [etc.]; ed. N. M. Pavlushkin. – М.: Stroizdat, 1986. – 487 p.
4. Proshin, A. P. Building solutions for protection from radiation / A.P. Proshin, E. V. Korolev, N. A. Ochkina, S. M. Sadenko; under the general ed. prof. A.P. Proshina. – Penza: PGASA, 2002. – 202 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК [72+69] : 620.91 – 049.35

*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 Александр Маркович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Городское
строительство и архитектура»
E-mail: ambereg@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

Beregovoy Aleksander Markovich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Urban
Construction and Architecture»
E-mail: ambereg@rambler.ru

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ КРЫШ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ

А.М. Береговой

По результатам натурных обследований зданий рассмотрены недостатки тепловой защиты стропильной, железобетонной чердачной и совмещенной конструкций крыш. С использованием критериального анализа дана оценка влияния на энергоэффективность зданий ошибок в проектировании и дефектов в строительстве этих конструкций. Выявлено влияние наиболее важных локальных критериев на энергоэффективность здания для каждого типа крыши. Показано, что эти критерии характеризуют состояние: тепловой защиты чердачного перекрытия и вентиляции холодного чердака, герметичности чердачного пространства и его теплоизоляции в крышах с теплым чердаком, паро-, гидро-, теплоизоляционных слоев в совмещенных крышах.

Ключевые слова: конструкции крыши, дефекты крыши, энергоэффективность зданий, локальные критерии энергоэффективности

INFLUENCE OF DEFECTS IN THE CONSTRUCTION OF ROOFS ON ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS

A.M. Beregovoy

Based on the results of field surveys of buildings, the disadvantages of thermal protection of the rafter roof, reinforced concrete attic and combined roof structure (roof without attic) are considered. Using criteria analysis, the impact of design errors and defects in the construction of these structures on the energy efficiency of buildings was estimated. The most important local criteria for influencing the energy efficiency of a building for each type of a roof are identified. It is shown that these criteria characterize the state: of the thermal protection of the attic floor and the ventilation of a cold attic, the tightness of attic space and its thermal insulation in roofs with a warm attic, steam-hydrothermal insulation layers in combined roof structures.

Keywords: roof construction, roof defect, building energy efficiency, local energy efficiency criteria

Результаты проведенных натурных обследований жилых и общественных зданий в г. Пензе показали, что на их энергоэффективность и теплозащитные свойства наружных ограждений значительное влияние оказывают недоработки проектных решений и дефекты при проведении строительных работ. В энергетическом паспорте здания не всегда в должной мере оценивается воздействие каждого из этих факторов на его теплозащитную характеристику. Это приводит к ошибкам в определении тепловых потерь и экологических параметров внутренней воздушной среды.

В задачу данного исследования входили анализ и оценка влияния на энергоэффективность здания ошибок в проектных решениях и допускаемых дефектов при возведении верхних ограждающих конструкций, нормативные требования к проектированию которых рассмотрены в [1,2]. Объектами натурных обследований служили четыре типа крыш, наиболее распространенных в строительстве гражданских зданий: 1 – стропильные, 2 – железобетонные с холодным чердаком, 3 – железобетонные с теплым чердаком, 4 – совмещенные.

Влияние дефектов и недоработок на теплозащитные свойства каждого из четырех типов крыш можно проанализировать на основе матрицы с помощью оценочного критерия K_n и локальных критериев κ_{mn} , рассмотренных в [3]:

$$\begin{matrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{matrix} \begin{vmatrix} \kappa_{11} & \kappa_{12} & \dots & \kappa_{1j} & \dots & \kappa_{1n} \\ \kappa_{21} & \kappa_{22} & \dots & \kappa_{2j} & \dots & \kappa_{2n} \\ \kappa_{31} & \kappa_{32} & \dots & \kappa_{3j} & \dots & \kappa_{3n} \\ \kappa_{41} & \kappa_{42} & \dots & \kappa_{4j} & \dots & \kappa_{4n} \end{vmatrix}$$

Анализ результатов обследований позволяет выделить для каждого типа крыши наиболее важные локальные критерии. В табл. 1 показано влияние таких критериев на энергоэффективность стропильной крыши, имеющей холодный чердак.

Т а б л и ц а 1

Влияние локальных критериев κ_{1n} на теплозащитные качества стропильной крыши

Наименование дефектов и ошибок в проектировании	Критерии κ_{1n}	Влияние критериев на энергоэффективность зданий
Недостаточное термосопротивление утеплителя на перекрытии чердака	κ_{11}	Увеличение теплового потока к поверхности кровли и тепловых потерь помещений верхнего этажа. Нарастание снежно-ледяного панциря на кровле, появление протечек в весенний период и рост теплопроводности утеплителя
Плохое утепление вентблоков и трубопроводов отопления	κ_{12}	
Повышенная воздухопроницаемость чердачного перекрытия	κ_{13}	
Заниженная площадь вентиляционных отверстий (слуховых окон)	κ_{14}	

Стропильные крыши широко применяются в малоэтажном строительстве.

При длительной эксплуатации здания влияние локальных критериев κ_{11} и κ_{13} на оценочный критерий K_1 может значительно увеличиться по причине постепенной деструкции утеплителя, роста его влажности или воздухопроницаемости, увеличения тепловых потерь через чердачное перекрытие. Оценка величины теплового потока, возникающего при эксфильтрации воздуха через наружное ограждение в результате снижения его сопротивления воздухопроницанию, дана в [4] с использованием формул

$$q_u = \frac{c_b \cdot w \cdot e^{c_b \cdot w \cdot R}}{e^{c_b \cdot w \cdot R_0} - 1} \cdot (t_b - t_n), \quad (1)$$

$$\omega = \Delta p / R_u, \quad (2)$$

$$\Delta p = 0,55H (\gamma_n - \gamma_b) + 0,03\gamma_n v^2. \quad (3)$$

С ростом этажности здания усложняется проблема обеспечения требуемого воздухообмена, который тесно связан с тепловым режимом и энергоэффективностью здания. Это объясняется недостаточной проработкой проектных решений и наличием определенных дефектов в железобетонной крыше как с холодным, так и, особенно, с теплым чердаком.

Поскольку способ вентилирования подкровельного пространства первого и второго типов крыши одинаков, то это обуславливает примерно одинаковую степень влияния оценочных критериев K_1 и K_2 на теплозащитные свойства этих крыш. По аналогии с табл. 1 показано влияние на оценочный критерий K_3 локальных критериев k_{3n} для железобетонной крыши с теплым чердаком (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Влияние локальных критериев k_{3n} на теплозащитные качества железобетонной крыши с теплым чердаком

Наименование дефектов и ошибок в проектировании	Критерии k_{3n}	Влияние критериев на энергоэффективность зданий
Плохая герметизация чердачного пространства	k_{31}	Низкий уровень работы системы естественной вентиляции. Недостаточный воздухообмен помещений. Ухудшение экологического состояния внутренней воздушной среды. Появление посторонних запахов в помещениях квартир
Отсутствие специальных оголовков – диффузоров в вентиляционных блоках	k_{32}	
Недостаточная высота чердачной вентиляционной шахты.	k_{33}	
Низкий уровень теплоизоляции наружных ограждений чердака	k_{34}	
Канализационные стояки не объединены в пределах секции чердака и не выведены одной трубой через вентиляционную шахту	k_{34}	

Совмещенные покрытия зданий, широко используемые в большепролетных общественных и промышленных зданиях, в отличие от первых трех типов крыш имеют малую степень ремонтпригодности. В связи с этим качество проектных и строительных работ при выполнении покрытия этого типа должно быть особенно высоким. В табл. 3 показано, какое влияние оказывают дефекты, обнаруженные при обследованиях, на теплозащитные и другие эксплуатационные характеристики покрытий зданий с рулонной кровлей (табл.3).

Обследования железобетонных совмещенных покрытий с кровлей из рубероидного ковра были выполнены на 5-этажных жилых зданиях старой застройки г. Пензы. Конструктивные слои совмещенных покрытий, находящиеся в зоне попеременного увлажнения и промерзания (кровля и основание под нее, верхний слой теплоизоляции), на некоторых зданиях подверглись интенсивным процессам разрушения вследствие потери водонепроницаемости. Критерий износа этих слоев и необходимые ограничения по чрезмерному их увлажнению могут быть выражены следующими зависимостями:

$$K_n = (R_b^{tp} - R_b^{\phi}) / R_b^{tp}, \quad (4)$$

$$R_b^{\phi} = 1/R_{пв} + \sum \delta/\mu + 1/R_{пн}, \quad (5)$$

$$R_b^{tp} = (e_b - E) R_{пн} / (E - e_n), \quad (6)$$

где K_n – критерий износа слоев (по Ильинскому В.М.); R_b^{tp} и R_b^{ϕ} – требуемое и фактическое сопротивление влагонепроницанию конструкции покрытия, $m^2 \cdot ч \cdot Па/мг$ (для однородного слоя в случае воздействия парообразной влаги [5]).

Влияние локальных критериев κ_{4n} на теплозащитные качества железобетонной совмещенной крыши

Дефекты в строительстве и ошибки в проектировании	Критерии κ_{4n}	Влияние критериев на энергоэффективность зданий
Недостаточное термическое сопротивление утеплителя	κ_{41}	Увеличение тепловых потерь помещений верхнего этажа. Систематическое увлажнение утеплителя диффундирующим потоком водяного пара со стороны помещений. Увеличение влажности утеплителя под воздействием атмосферной влаги из-за протечек. Снижение энергоэффективности здания в результате повышения тепловых потерь и ухудшение экологических параметров воздушной среды помещений верхнего этажа
Некачественная пароизоляция под утеплителем	κ_{42}	
Отсутствие защитного слоя, недостаточная долговечность и стойкость к воздействию ультрафиолетового облучения материала кровли	κ_{43}	
Плохое примыкание кровли к выступающим конструкциям или карнизу, в том числе отсутствие в примыканиях дополнительных слоев	κ_{44}	
Ошибки в проектировании и выполнении системы водоотвода	κ_{45}	
Укладка влажного утеплителя при производстве строительно-монтажных работ	κ_{46}	

Дефекты покрытия, выраженные критериями $\kappa_{42} \dots \kappa_{44}$ (см. табл. 3), приводят к росту влажности утеплителя и увеличению его коэффициента теплопроводности в соответствии с зависимостью

$$\lambda_{\text{в}} = f(\omega_0); \quad \lambda_{\text{в}} = \lambda_{\text{с}} \left(1 + \omega_0 \cdot \frac{\delta_{\omega}}{100} \right), \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{с}}$ – коэффициент теплопроводности сухого материала; ω_0 – влажность материала, % по объему; δ_{ω} – прирост коэффициента теплопроводности на 1% объемной влажности материала.

Ранее проведенные исследования указали на значительный рост коэффициента теплопроводности влажного слоя наружного ограждения, находящегося в зоне отрицательных температур [6, 7]. Влажность керамзита и ячеистого бетона в зоне положительных температур многократно превышала предельно допустимую величину влажности этих материалов.

Таким образом, с использованием критериального анализа выявлены наиболее важные дефекты в строительстве и ошибки в проектировании конструкций крыш в виде локальных критериев, влияющих на энергоэффективность здания. Такие критерии позволяют оценить тепловую защиту чердачного перекрытия и систему вентиляции холодного чердака, уровень герметичности и теплоизоляцию теплого чердака, состояние паро-, гидро-, теплоизоляционных слоев совмещенных крыш.

Список литературы

1. Стандарт организации 05.05.2017. Крыши и кровли. СТО НОСТРОЙ 2.13.81 - 2012. – М., 2013. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/397834 (дата обращения: 19.03.20 г.).
2. СП 17.13330.2011. Кровли. Актуализированная редакция СНиП II-26-76. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084095> (дата обращения 19.03.20 г.)

3. Береговой, А.М. Показатели эффективности в системном анализе теплопотерь через энергосберегающие наружные ограждения / А.М. Береговой, О.Л. Викторова, В.А. Береговой // Известия Вузов. Строительство. – 2009. – № 5. – С. 57–61.

4. Береговой, А.М. Оценка тепловых потерь при эксфильтрации воздуха через пористую структуру материала ограждения / А.М. Береговой, М.А. Дерина, В.А. Береговой, А.В. Мальцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 79–83.

5. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23 – 02 – 2003. – М.: НИИСФ РААСН, 2012. – 95 с.

6. Береговой, А.М. Температурно-влажностное состояние наружных ограждений в условиях фазовых переходов влаги и агрессивных воздействий среды / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3 (32). – С. 99–104.

7. Мальцев, А.В. Влияние теплопроводности материала наружных ограждений в стадии увлажнения и промерзания на энергоэффективность зданий / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №1. – С. 57–61.

References

1. Standard of the organization 05.05.2017. Roofs and roofs. STO NOSTROI 2.13.81-2012. – Moscow, 2013. – URL: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/397834 (access date: 19.03.20 г.).

2. SP 17.13330.2011. Roofs. Actualized edition of SNiP II-26-76 – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084095> (access date: 19.03.20).

3. Beregovoy, A.M. Performance indicators in the system analysis of heat losses through exterior enclosure structures / A.M. Beregovoy, O.L. Viktorova, V.A. Beregovoy // News of higher educational institutions. – 2009 – No. 5. – P. 57–61.

4. Beregovoy, A.M. Evaluation of heat losses during exfiltration of air through the porous structure of the material of enclosure structure / A.M. Beregovoy, M.A. Derina, V.A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering. – 2014. – No.2. – P. 79–83.

5. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Actualized edition of SNiP 23-02-2003. – М.: NIISF RAASN, 2012. – 95 p.

6. Beregovoy, A.M. Temperature-moisture state of external enclosure structures in the conditions of phase transitions of moisture and aggressive impact of environment / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy // Regional architecture and engineering. – 2017. – №3 (32). – P. 99 – 104.

7. Maltsev, A.V. Influence of thermal conductivity of the material of external enclosure structures in the stage of moistening and freezing on the energy efficiency of buildings / A.V. Maltsev, A.M. Beregovoi, V.A. Beregovoi, M.A. Derina // Regional architecture and engineering. – 2013. – No. 1. – P. 57–61.

УДК 519.633

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

Бакушев Сергей Васильевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Механика»
E-mail: bakuchsv@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

Bakushev Sergey Vasilevich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Mechanics»
E-mail: bakuchsv@mail.ru

АППРОКСИМАЦИЯ ДИАГРАММ ОБЪЁМНОГО И СДВИГОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ БИЛИНЕЙНЫМИ ФУНКЦИЯМИ

С.В. Бакушев

Рассматриваются вопросы билинейной аппроксимации диаграмм объёмного и сдвигового деформирования конструкционных материалов. Исходя из предположения о независимости, вообще говоря, друг от друга диаграмм объёмного и сдвигового деформирования рассмотрены шесть основных случаев физических зависимостей, зависящих от взаимного расположения точек излома билинейных диаграмм объёмного и сдвигового деформирования. Построение билинейных физических зависимостей основано на вычислении секущих модулей объёмного и сдвигового деформирования. При этом на первом линейном участке диаграмм секущий модуль и объёмного и сдвигового деформирования постоянен, в то время как на втором линейном участке диаграмм секущий модуль объёмного деформирования является функцией объёмной деформации, а секущий модуль сдвига – функцией интенсивности деформаций сдвига. На основе полученных билинейных физических уравнений выводятся дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для элементов конструкций, находящихся в условиях одномерного плоского деформирования. Используются две математические модели, описывающие механическое поведение материала конструкций: модель, не учитывающая геометрическую нелинейность, и модель, учитывающая геометрическую нелинейность. Построенные в статье дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях могут найти применение при определении напряжённо-деформированного состояния элементов конструкций, находящихся в условиях одномерного плоского деформирования и описываемых математическими моделями как с учётом, так и без учёта геометрической нелинейности, физические соотношения для которых, построенные на основе экспериментальных данных, аппроксимированы билинейными функциями.

Ключевые слова: конструкционные материалы, объёмное и сдвиговое деформирование, плоская одномерная деформация, билинейные замыкающие уравнения, дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях, геометрическая линейность, геометрическая нелинейность

APPROXIMATION OF DIAGRAMS OF VOLUME AND SHEAR DEFORMATION OF STRUCTURAL MATERIALS BY BILINEAR FUNCTIONS

S.V. Bakushev

The problems of bilinear approximation of the diagrams of volumetric and shear deformation of structural materials are under analysis there. Based on the assumption of independence of volume and shear deformation diagrams, six main cases of physical dependencies, depending on positional

relationship of breaking points of bilinear diagrams of volume and shear deformation are analyzed. The construction of bilinear physical dependencies is based on calculation of secant modulus of volume and shear deformation. Therefore, at the first linear portion of the diagrams, the secant modulus of volume and shear deformation is constant, while at the second linear portion of the diagrams the secant modulus of volume deformation is a function of volume deformation and the shear secant modulus is an intensity shear deformation function. On the basis of received bilinear physical equations, differential equations of equilibrium at displacements for structural elements at the conditions of one-dimensional planar deformation are introduced. Two mathematical models describing the mechanical behavior of the material of structures: a model that does not take into account geometric nonlinearity and a model that takes into account geometric nonlinearity are used. The constructed differential equations of equilibrium in displacements can be applied while determining strain-stress state of structural elements at the condition of one-dimensional planar deformation, described by mathematical models both regarding and disregarding geometrical nonlinearity, physical relationships for which are based on experimental data approximated by bilinear functions.

Keywords: structural materials, volumetric and shear deformation, plane one-dimensional deformation, bilinear closing equations, differential equations of equilibrium in displacements, geometric linearity, geometric nonlinearity

Введение. Аналитическое решение задач расчёта деформируемых тел и элементов строительных конструкций с учётом их реального поведения под нагрузкой, то есть с учётом геометрической и физической нелинейности, является, достаточно часто чрезвычайно затруднительным с точки зрения математики. В настоящее время эти затруднения успешно преодолеваются путём использования приближённых (численных) методов решения задач механики деформируемого твёрдого тела, в частности путём использования метода конечных¹ или граничных² элементов (МКЭ или МГЭ). Складывается ощущение полного отказа от разработки аналитических методов и подходов к решению данного класса задач. Однако численные методы имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что они не позволяют выявлять общие закономерности в работе той или иной конструкции под нагрузкой. При помощи численных методов решается конкретная задача для конкретных исходных данных. При выполнении проектных работ, когда возникает необходимость в прочностном или деформационном расчёте какого-либо элемента конструкции, самым подходящим инструментом, конечно, будет метод конечных элементов. Однако если необходимо выявить влияние на напряжённо-деформированное состояние конструкции какого-либо внешнего либо внутреннего фактора, то обойтись без аналитических методов бывает затруднительно.

Разработка аналитических методов расчёта деформируемых тел опирается на их физическую природу, проявляющуюся в том, что деформации тел связаны с возникающими в них напряжениями, причём эта связь и сугубо нелинейна, и неоднозначна и трудно поддаётся аналитическому описанию. Точное аналитическое описание зависимостей между напряжениями и деформациями приводит к чрезвычайно сложным дифференциальным уравнениям равновесия. Примером этого может служить нелинейная теория упругости В.В.Новожилова. Несмотря на то что физические уравнения в нелинейной теории упругости В.В.Новожилова имеют достаточно простой вид и построены на самых общих предположениях исходя из тензорных свойств понятий «напряжение» и «деформация», дифференциальные уравнения равновесия, имеющие чрезвычайно сложный вид, фактически исключают построение аналитических решений.

Одним из приёмов разрешения данной патовой ситуации может быть следующий подход. Соотношения, замыкающие физические уравнения, следует строить, основыв-

¹ Розин Л.Ф. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. М.: Стройиздат, 1977. 128 с.; Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.

² Угодчиков А.Г., Хуторянский Н.М. Метод граничных элементов в механике деформируемого твёрдого тела. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1986. 296 с.; Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 524 с., ил.

ваясь на реальных диаграммах деформирования твёрдых тел, и как можно точнее, не обращая внимания на сложность получаемых соотношений. Затем получаемые сложные аналитические выражения для физических уравнений надо аппроксимировать какими-либо простыми функциями, например билинейными. Получаемые в дальнейшем дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях, основанные на билинейных физических зависимостях, будут иметь относительно простую структуру.

В данной работе представлено построение дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях для элементов строительных конструкций, находящихся в условиях одномерного плоского деформирования, при аппроксимации замыкающих уравнений произвольного, вообще говоря, вида билинейными функциями. В качестве математических моделей конструкционных материалов используются как модели, не учитывающие геометрическую нелинейность, так и модели, учитывающие геометрическую нелинейность.

Обзор научных публикаций последних лет показывает, что исследователи при расчёте конструкций используют различные модели механики деформируемого твёрдого тела. Так, работа [1] посвящена разработке физически нелинейных соотношений для составных многофазных нелинейно-упругих стержней. В основе теории лежит аппроксимация целыми рациональными полиномами произвольной степени диаграмм деформирования фазовых материалов. В работе [2] на основе информации только о базовых механических характеристиках материалов – пределе текучести, пределе прочности, относительном удлинении при разрыве, относительном поперечном сужении, модуле упругости – предлагаются простые (линейная, параболическая, комбинированная) аппроксимации диаграммы деформирования пластичного материала. Показано, что если известны предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности и соответствующая деформация, напряжение в момент разрушения и остаточное удлинение, то можно получить более точную условную диаграмму напряжений пластичного материала. В статье [3] представлен анализ предложений различных исследователей по аппроксимации диаграмм деформирования древесины при сжатии аналитическими выражениями. На основании результатов испытаний рекомендовано аппроксимировать диаграмму напряжений древесины при сжатии полиномом третьей степени.

Вопросам аппроксимации реальных диаграмм деформирования конструкционных материалов также уделяется немалое внимание. Так, например, статья [4] посвящена анализу возможности применения неравномерных би-сплайнов для уточнённого описания поведения материала при упругопластическом деформировании. В работе [5] рассматривается разработка вариационного метода расчёта стержневой конструкции с учётом пластических деформаций в предположении, что при деформировании стержней связь между нормальными напряжениями и продольной деформацией стержня описывается диаграммой линейно-упрочняющего тела. В работе [6] представлены общие соотношения развития состояния предразрушения в условиях продольно-поперечного изгиба стержневых элементов с трапециевидным поперечным сечением на основе пятизвенной аппроксимации диаграмм деформирования для конструкционных материалов, разносопротивляющихся растяжению и сжатию. Билинейная модель используется и в работе [7] для анализа прогиба композитных бетонных балок, армированных полимерными волокнами, в зависимости от величины нагрузки. В работе [8] для аппроксимации нелинейных зависимостей между интенсивностями напряжений и деформаций в конструкционных материалах предлагалось использовать сплайн-функции. Отмечалось, что «...применение сплайнов удобно в основном для исследовательских целей, ибо процесс вычисления напряжений и деформаций в конструкциях в этом случае значительно усложняется». В статье [9] рассматривается аппроксимация диаграмм истинных напряжений и деформаций и устанавливается их взаимосвязь при упругом и пластическом деформировании. В работе [10] даётся обзор существующих и особенности описания диаграмм деформирования бетона при сжатии в отечественных и зарубежных (европейские страны, Индия, Китай, Бразилия, Япония, Украина,

Белоруссия) нормативных документах. Отмечено использование как криволинейных, так и параболических линейных и билинейных диаграмм. В статье [11] приведен обзор нормативных документов по вопросу учёта физической нелинейности с учётом истории нагружения и предложена методика построения билинейной модели деформирования стального стержня при одноосном знакопеременном нагружении.

Следует отметить [12], что основным способом исследования и получения новых знаний в области механики деформируемого твёрдого тела является математическое моделирование, основанное на физическом и натурном экспериментах. Разработка математических моделей, адекватно описывающих реальное поведение деформируемых тел [13–17], включает их математическое обоснование и корректную постановку начально-краевых задач. Многопараметричность исследуемых задач, их нелинейность и многомерность приводят к необходимости линеаризации и упрощению математических моделей.

В данной работе представлено построение дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях для элементов строительных конструкций, находящихся в условиях одномерного плоского деформирования ($u_x = u(x)$, $u_y = 0$, $u_z = 0$), при аппроксимации замыкающих уравнений произвольного, вообще говоря, вида билинейными функциями без учёта (рис. 1 и 2) и с учётом (рис. 3 и 4) геометрической нелинейности.

Физические уравнения для геометрически линейной модели. В соответствии с рис. 1 секущие модули объёмного расширения (сжатия) $K = K(\varepsilon, \Gamma)$ и сдвига $G = G(\varepsilon, \Gamma)$ без учёта геометрической нелинейности на первом прямолинейном участке диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ будут определяться выражениями:

$$K = \frac{1}{3} K_0 = \text{const}; \quad G = G_0 = \text{const}. \quad (1)$$

На втором прямолинейном участке диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ секущий модуль объёмного расширения (сжатия) $K = K(\varepsilon, \Gamma)$ и секущий модуль сдвига $G = G(\varepsilon, \Gamma)$ будут определяться выражениями:

$$K = K(\varepsilon) = \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] \neq \text{const}; \quad (2)$$

$$G = G(\Gamma) = G_1 + (G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \neq \text{const}.$$

Здесь K_0 – начальный модуль объёмного расширения (сжатия); G_0 – начальный модуль сдвига; K_1 – модуль упрочнения при объёмном расширении (сжатии); G_1 – модуль упрочнения при сдвиге; σ – первый инвариант тензора напряжений; ε – первый инвариант тензора деформаций; T – интенсивность касательных напряжений; Γ – интенсивность деформаций сдвига.

При плоском одномерном деформировании элементов строительных конструкций для геометрически линейной модели $\varepsilon = \varepsilon_{xx}$; $\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{xx}^2}$, причём $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$ и, следо-

вательно, $\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2}$. Тогда $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial \Gamma}{\partial x} = \frac{4}{3\Gamma} \varepsilon_{xx} \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} = \frac{4}{3\Gamma} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$.

Поскольку $\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon^2}$, то графики билинейных диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ при плоском одномерном деформировании связаны друг с другом. Ввиду этого, рассмотрим шесть основных случаев физических зависимостей.

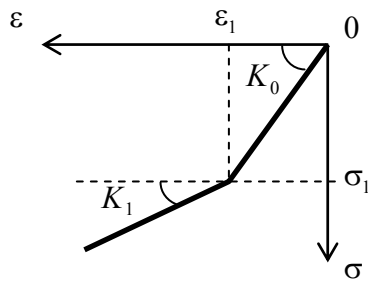


Рис. 1. Диаграмма $\sigma \approx \varepsilon$

Figure 1. Chart $\sigma \approx \varepsilon$

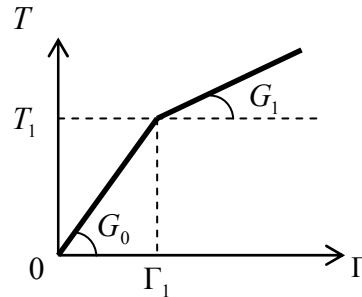


Рис. 2. Диаграмма $T \approx \Gamma$

Figure 2. Chart $T \approx \Gamma$

Случай 1: $K_0 \neq K_1$, $G_0 \neq G_1$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования совпадают, то есть $|\varepsilon_1| = \frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $0 \leq \Gamma \leq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1|$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$.

В этом случае физические уравнения одномерной плоской деформации с учётом формул (1₁) и (1₂) будут иметь вид:

$$\sigma_{xx} = \left(\frac{1}{3} K_0 + \frac{4}{3} G_0 \right) \varepsilon_{xx}; \quad \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \left(\frac{1}{3} K_0 - \frac{2}{3} G_0 \right) \varepsilon_{xx}. \quad (3)$$

Случай 2: $K_0 \neq K_1$, $G_0 \neq G_1$. Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon_1| \leq |\varepsilon| \leq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1|$ и $\frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1| \leq \Gamma \leq \Gamma_1$.

В этом случае физические уравнения одномерной плоской деформации с учётом формул (1₂) и (2₁) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] \varepsilon + 2G_0 \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{yy} = \sigma_{zz} &= \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] \varepsilon + 2G_0 \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3} \varepsilon \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Случай 3: $K_0 \neq K_1$, $G_0 \neq G_1$. Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $\frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma_1 \leq \Gamma \leq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1|$.

В этом случае физические уравнения одномерной плоской деформации с учётом формул (1₁) и (2₂) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{1}{3}K_0\varepsilon + 2\left[G_1 + (G_0 - G_1)\frac{\Gamma_1}{\Gamma}\right]\left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon\right); \\ \sigma_{yy} = \sigma_{zz} &= \frac{1}{3}K_0\varepsilon + 2\left[G_1 + (G_0 - G_1)\frac{\Gamma_1}{\Gamma}\right]\left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon\right).\end{aligned}\quad (5)$$

Случай 4: $K_0 \neq K_1$, $G_0 \neq G_1$. Точки излома совпадают, то есть $|\varepsilon_1| = \frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma \geq \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq \frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1$ и $\Gamma \geq \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma \geq \frac{2}{\sqrt{3}}|\varepsilon_1|$.

В этом случае физические уравнения одномерной плоской деформации с учётом формул (2₁) и (2₂) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{1}{3}\left[K_1 + (K_0 - K_1)\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}\right]\varepsilon + 2\left[G_1 + (G_0 - G_1)\frac{\Gamma_1}{\Gamma}\right]\left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon\right); \\ \sigma_{yy} = \sigma_{zz} &= \frac{1}{3}\left[K_1 + (K_0 - K_1)\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}\right]\varepsilon + 2\left[G_1 + (G_0 - G_1)\frac{\Gamma_1}{\Gamma}\right]\left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon\right).\end{aligned}\quad (6)$$

Случай 5: $K_0 = K_1$, $G_0 \neq G_1$. Точка излома на диаграмме $\sigma \approx \varepsilon$ отсутствует. При этом, если $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$, то физические уравнения одномерного плоского деформирования будут иметь вид (3); если $\Gamma \geq \Gamma_1$, то физические уравнения одномерного плоского деформирования будут иметь вид (5).

Случай 6: $K_0 \neq K_1$, $G_0 = G_1$. Точка излома на диаграмме $T \approx \Gamma$ отсутствует. При этом, если $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$, то физические уравнения одномерного плоского деформирования будут иметь вид (3); если $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_1|$, то физические уравнения одномерного плоского деформирования будут иметь вид (4).

Дифференциальные уравнения для геометрически линейной модели. Подставив физические уравнения (5) – (8) в дифференциальное уравнение равновесия одномерного плоского деформирования конструкционных материалов $\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + F_x = 0$, получим четыре вида разрешающих уравнений в перемещениях.

1. Для физических уравнений (3) дифференциальное уравнение равновесия в перемещениях имеет вид:

$$\left(\frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_0\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_x = 0. \quad (7)$$

2. Для физических уравнений (4) получим:

$$\left(\frac{1}{3}K_1 + \frac{4}{3}G_0\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_x = 0. \quad (8)$$

3. Для физических уравнений (5):

$$\left\{ \left(\frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_1 \right) + \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left[1 - \frac{4}{3\Gamma} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_x = 0. \quad (9)$$

4. Для физических уравнений (6):

$$\left\{ \left(\frac{1}{3}K_1 + \frac{4}{3}G_1 \right) + \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left[1 - \frac{4}{3\Gamma} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_x = 0. \quad (10)$$

Таким образом, дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях элементов строительных конструкций, находящихся в условиях одномерного плоского деформирования, при билинейной аппроксимации физических соотношений без учёта геометрической нелинейности построены.

Физические уравнения для геометрически нелинейной модели. Аппроксимация замыкающих уравнений произвольной формы билинейными функциями для геометрически нелинейной модели конструкционных материалов [18] представлена на рис. 3 и 4.

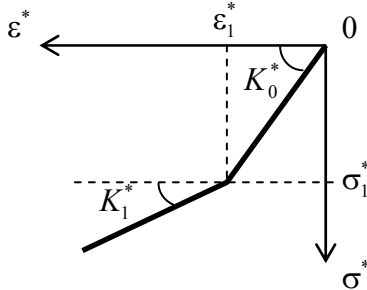


Рис. 3. Диаграмма $\sigma^* \approx \varepsilon^*$

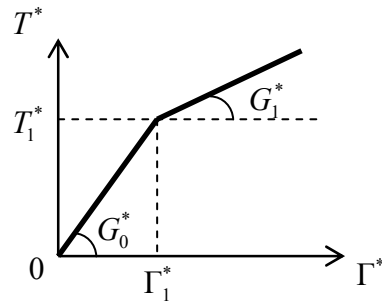


Рис. 4. Диаграмма $T^* \approx \Gamma^*$

Figure 3. Chart $\sigma^* \approx \varepsilon^*$

Figure 4. Chart $T^* \approx \Gamma^*$

Секущие модули объёмного расширения (сжатия) $K^* = K^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$ и сдвига $G^* = G^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$ для геометрически нелинейной модели на первом прямолинейном участке диаграмм $\sigma^* \approx \varepsilon^*$ и $T^* \approx \Gamma^*$ будут определяться выражениями:

$$K^* = \frac{1}{3}K_0^* = \text{const}; \quad G^* = G_0^* = \text{const}. \quad (11)$$

На втором прямолинейном участке диаграмм $\sigma^* \approx \varepsilon^*$ и $T^* \approx \Gamma^*$ секущий модуль объёмного расширения (сжатия) $K^* = K^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$ и секущий модуль сдвига $G^* = G^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$ будут определяться выражениями:

$$K^* = K^*(\varepsilon^*) = \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \neq \text{const}; \quad (12)$$

$$G^* = G^*(\Gamma^*) = G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \neq \text{const}.$$

Здесь K_0^* – геометрически нелинейный аналог начального модуля объёмного расширения (сжатия); G_0^* – геометрически нелинейный аналог начального модуля

сдвига; K_1^* – геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при объёмном расширении (сжатии); G_1^* – геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при сдвиге; σ^* – первый инвариант тензора обобщённых напряжений; ε^* – первый инвариант тензора нелинейных деформаций; T^* – интенсивность обобщённых касательных напряжений; Γ^* – интенсивность нелинейных деформаций сдвига.

При плоском одномерном деформировании элементов строительных конструкций геометрически нелинейной модели $\varepsilon^* = \varepsilon_{xx}^*$; $\Gamma^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{xx}^{*2}}$, причём $\varepsilon_{xx}^* = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2$ и,

следовательно, $\Gamma^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]^2}$. Тогда $\frac{\partial \varepsilon^*}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_{xx}^*}{\partial x} = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ и

$$\frac{\partial \Gamma^*}{\partial x} = \frac{4}{3\Gamma^*} \varepsilon_{xx}^* \frac{\partial \varepsilon_{xx}^*}{\partial x} = \frac{4}{3\Gamma^*} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Рассмотрим шесть основных случаев физических зависимостей при учёте геометрической нелинейности.

Случай 1: $K_0^* \neq K_1^*$, $G_0^* \neq G_1^*$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| = \frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1^*|$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1^*$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$.

В этом случае физические уравнения одномерной плоской деформации с учётом формул (11₁) и (11₂) будут иметь вид:

$$\sigma_{xx}^* = \left(\frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) \varepsilon_{xx}^*; \quad \sigma_{yy}^* = \sigma_{zz}^* = \left(\frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_0^* \right) \varepsilon_{xx}^*. \quad (13)$$

Случай 2: $K_0^* \neq K_1^*$, $G_0^* \neq G_1^*$. Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon_1^*| \leq |\varepsilon^*| \leq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1^*|$ и $\frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1^*| \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$.

В этом случае физические уравнения одномерной плоской деформации с учётом формул (11₂) и (12₁) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2G_0^* \left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{yy}^* = \sigma_{zz}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2G_0^* \left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Случай 3: $K_0^* \neq K_1^*$, $G_0^* \neq G_1^*$. Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $\frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1^* \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma_1^* \leq \Gamma^* \leq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1^*|$.

В этом случае физические уравнения одномерной плоской деформации с учётом формул (11₁) и (12₂) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2 \left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{yy}^* &= \sigma_{zz}^* = \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2 \left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Случай 4: $K_0^* \neq K_1^*$, $G_0^* \neq G_1^*$. Точки излома совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| = \frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon^*| \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1^*$ и $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma^* \geq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1^*|$.

В этом случае физические уравнения одномерной плоской деформации с учётом формул (12₁) и (12₂) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2 \left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{yy}^* &= \sigma_{zz}^* = \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2 \left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Случай 5: $K_0^* = K_1^*$, $G_0^* = G_1^*$. Точка излома на диаграмме $\sigma^* \approx \varepsilon^*$ отсутствует. При этом, если $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$, то физические уравнения одномерного плоского деформирования будут иметь вид (13); если $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$, то физические уравнения одномерного плоского деформирования будут иметь вид (15).

Случай 6: $K_0^* = K_1^*$, $G_0^* = G_1^*$. Точка излома на диаграмме $T^* \approx \Gamma^*$ отсутствует. При этом, если $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$, то физические уравнения одномерного плоского деформирования будут иметь вид (13); если $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$, то физические уравнения одномерного плоского деформирования будут иметь вид (14).

Дифференциальные уравнения для геометрически нелинейной модели. Подставив физические уравнения (13) – (16) в дифференциальное уравнение равновесия одномерного плоского деформирования конструкционных материалов при учёте геометрической нелинейности $\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \sigma_{xx}^* \right] + F_x^* = 0$, получим четыре вида разрешающих уравнений в перемещениях.

1. Для физических уравнений (13):

$$\left(\frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(1 + \frac{u}{x} \right) F_x^* = 0. \quad (17)$$

2. Для физических уравнений (14):

$$\left\{ \left(\frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] + (K_0^* - K_1^*) \varepsilon_1^* \right\} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(1 + \frac{u}{x} \right) F_x = 0. \quad (18)$$

3. Для физических уравнений (15):

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \left\{ \left(\frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_1^* \right) + \frac{4}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} - \frac{16}{9} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} \times \right. \\ & \left. \times \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]^2 \right\} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left\{ \left(\frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_1^* \right) \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. + \frac{4}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(1 + \frac{u}{x} \right) F_x = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

4. Для физических уравнений (16):

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \left\{ \left(\frac{1}{3} K_1^* + \frac{4}{3} G_1^* \right) + \frac{4}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} - \frac{16}{9} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} \times \right. \\ & \left. \times \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]^2 \right\} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left\{ \left(\frac{1}{3} K_1^* + \frac{4}{3} G_1^* \right) \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. + \frac{4}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] + (K_0^* - K_1^*) \varepsilon_1^* \right\} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \\ & + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(1 + \frac{u}{x} \right) F_x = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Таким образом, дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях, описывающие напряжённо-деформированное состояние элементов строительных конструкций, находящихся в условиях одномерного плоского деформирования, при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений с учётом геометрической нелинейности построены.

Заключение. Построенные дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях могут найти применение при определении напряжённо-деформированного состояния элементов строительных конструкций, которые находятся в условиях одномерного плоского деформирования, как с учётом, так и без учёта геометрической нелинейности, физические соотношения для которых описываются билинейными функциями.

Список литературы

1. Мищенко, А.В. Расчётная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней / А.В. Мищенко // Вестник МГСУ. – 2014. – № 5. – С. 35–43.
2. Захаров, А.А. Аппроксимация диаграммы деформирования материала / А.А. Захаров, К.Э. Ласунский // Известия Московского государственного индустриального университета. – 2009. – № 3 (16). – С. 42–46.

3. Вареник, К.А. Аппроксимация диаграммы деформирования древесины / К.А. Вареник // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2013. – № 75–1. – С. 60–64.
4. Галахарь, А.С. О рациональной форме записи уравнений состояния для решения задач пластического деформирования / А.С. Галахарь, С.С. Гаврюшин, Е.А. Деулин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 5. – С. 3–11.
5. Серазутдинов, М.Н. Расчёт стержневых конструкций из упрочняющихся и идеально упругопластических материалов / М.Н. Серазутдинов, М.Н. Убайдуллоев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 2 (40). – С. 124–130.
6. Батулин, А.А. Расчёт состояний предразрушения изгибаемых балок из разносопротивляющихся материалов / А.А. Батулин, Ю.В. Немировский // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). – 2013. – Т. 16, № 56. – С. 32–44.
7. Jingquan, Wang. Bilinear load-deflection model of fiber-reinforced polymer–concrete composite beam with interface slip / Jingquan Wang, Xingxing Zou, Yu Feng // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – № 7(7). – DOI 10.1177/1687814015590312.
8. Макеев, А.Ф. Некоторые особенности аппроксимации диаграмм деформирования материалов / А.Ф. Макеев, И.Г. Овчинников // Механика деформируемых сред. – 1978. – № 5. – С. 152–157.
9. Катаев, Ю.П. Построение диаграмм истинных напряжений при пластическом деформировании металлов / Ю.П. Катаев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2012. – № 4. – С. 63–65.
10. Панфилов, Д.А. Обзор существующих диаграмм деформирования бетона при сжатии в отечественных и зарубежных нормативных документах / Д.А. Панфилов, А.А. Пищулев, К.И. Гимадетдинов // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 3. – С. 80–84.
11. Пинус, Б.И. Моделирование физической нелинейности стального стержня при одноосном нагружении с учётом истории деформирования / Б.И. Пинус, В.В. Безделев, Г.И. Гребенюк, П.С. Созонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 5 (653). – С. 122–128.
12. Ковеня, В.М. Некоторые проблемы и тенденции развития математического моделирования / Ковеня В.М. // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43, № 3 (253). – С. 3–14.
13. Гениев, Г.А. К вопросу о деформационной теории пластичности сыпучей среды / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1974. – № 4. – С. 8–10.
14. Гениев, Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. – М., Стройиздат, 1974. – 316 с.
15. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
16. Садовская, О.В. Математическое моделирование в задачах механики сыпучих сред: монография / О.В. Садовская, В.М. Садовский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
17. Свистков, А.Л. Дифференциальные определяющие уравнения несжимаемых сред при конечных деформациях / А.Л. Свистков, Б. Лауке // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 3 (295). – С. 158–170.
18. Бакушев, С.В. Геометрически и физически нелинейная механика сплошной среды: Плоская задача / С.В. Бакушев. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2020 – 312 с.

References

1. Mishenko, A.V. Method of formation of nonlinear physical correlation in direct and inverse problem calculation of multiphase bars / A.V. Mishenko // Bulletin of South-Urals State University. Series: Construction and Architecture. – 2014. – Vol. 14., N 3. – P. 12–16.

2. Zakharov, A.A. Approximation of the material deformation diagram / A.A. Zakharov, K.E. Lasunsky // *News of Moscow State Industrial University*. – 2009. – No. 3 (16). – P. 42–46.
3. Varenik, K.A. Approximation of wood deformation diagram / K.A. Varenik // *Bulletin of Novgorod State University named after Yaroslav the Wise*. – 2013. – No. 75-1. – P. 60–64.
4. Halakhar, A.S. About the rational form of writing equations of state for solving problems of plastic deformation / A.S. Halakhar, S.S. Gavryushin, E.A. Deulin // *News of Higher Educational Institutions. Engineering*. – 2011. – No. 5. – P. 3–11.
5. Serazutdinov, M.N. Calculation of bar structures from hardened and elastic perfectly plastic materials / M.N. Serazutdinov, M.N. Ubaidulloev // *Bulletin of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2017. – No. 2 (40). – P. 124–130.
6. Baturin, A.A. Calculation of the states of prefracture of bent bar made of materials with different resistance / A.A. Baturin, Yu.V. Nemirovsky // *Works of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. – 2013. – Vol. 16, No. 56. – P. 32–44.
7. Jingquan, Wang. Bilinear load-deflection model of fiber-reinforced polymer–concrete composite beam with interface slip / Jingquan Wang, Xingxing Zou, Yu Feng // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 7(7). – DOI 10.1177/1687814015590312.
8. Makeev, A.F. Some peculiarities of material straining diagram approximation / A.F. Makeev, I.G. Ovchinnikov // *Mechanics of Deformable Medium*. – 1978. – N 5. – P. 152–157.
9. Kataev, Yu.P. Construction of true stress diagrams at plastic deformation of metals. / Yu.P. Kataev // *News of Higher Educational Institutions. Aeronautical Engineering*. – 2012. – No. 4. – P. 63–65.
10. Panfilov, D.A. Review of existing diagrams of concrete deformation at compression in home and foreign regulation documents / D.A. Panfilov, A.A. Pishchulev, K.I. Gimadetdinov // *Industrial and Civil Engineering*. – 2014. – N 3. – P. 80–84.
11. Pinus, B.I. Modeling of physical nonlinearity of steel rod at single-axis loading with due regard to strain history / B.I. Pinus, V.V. Bezdelev, G.I. Grebenyuk, P.S. Sozonov // *News of Higher Educational Institutions. Construction*. – 2013. – N 5 (653). – P. 122–128.
12. Kovenya, V.M. Some issues and tendencies of mathematical modeling development / V.M. Kovenya // *Applied mechanics and technical physics*. – 2002. – Vol. 43, N 3 (253). – P. 3–14.
13. Geniev, G.A. About the question of the deformation theory of plasticity of granular medium / G.A. Geniev // *Building Mechanics and Structural Analysis*. – 1974. – No.4. – P. 8–10.
14. Geniev, G.A. Plasticity theory of concrete and iron-concrete / G.A. Geniev, V.N. Kissyuk, G.A. Tyupin. – M., Stroiizdat, 1974. – 316 p.
15. Karpenko, N.I. General models of iron-concrete mechanics / N.I. Karpenko. – M.: Stroiizdat, 1996. – 416 p.
16. Sadovskaya, O.V. Mathematical modeling in loose medium mechanics problems: monograph / O.V. Sadovskaya, V.M. Sadovskii. – M.: Fizmatlit, 2008. – 368 p.
17. Svistkov, A.L. Differential equation determiners of incompressible medium in final strain / A.L. Svistkov, B. Lauke // *Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2009. – Vol. 50, N3 (295). – P.158–170.
18. Bakushev, S.V. Geometrical and physic non-linear mechanic of continuous mediums: Plane problem / S.V. Bakushev. – M.: Book House «LIBROCOM», 2020. – 312 p.

УДК 519.7

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.

Budylna 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

ВЕТВЯЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В ОЦЕНКЕ РИСКА

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

Решена задача оптимального управления ветвящимся марковским процессом. Приведены результаты оптимизации управления риском для трехмодульной системы по принципу максимума Понтрягина в среде Matlab. Показана возможность уточнения оптимального управления: полученное управление принимается в качестве начального в методе спуска. Указаны параметры стационарного управления. Подход рекомендуется использовать при анализе лавинообразного обрушения зданий и сооружений.

Ключевые слова: проектирование систем, объекты повышенного риска, марковские процессы, ветвящиеся процессы, вероятностные переходы, оценка риска

BRANCHING PROCESSES IN RISK ASSESSMENT

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

The problem of optimal control of Markov branching process is solved. The results of risk management optimization for the three-module Matlab system based on the Pontryagin maximum principle are presented. The possibility of clarifying the optimal control is shown: the control obtained is accepted as the initial one in the descent method. Parameters of stationary control are indicated. The approach is recommended to be used when analyzing the avalanche-like collapse of buildings and structures.

Keywords: systems design, high-risk objects, Markov processes, branching processes, probabilistic transitions, risk assessment

В настоящее время для описания функционирования проектируемых и действующих сложных систем все чаще используются марковские цепи (состояние системы в рассматриваемый момент времени не зависит от того, когда и при каких обстоятельствах система перешла в это состояние). Марковский процесс может быть как с дискретными состояниями (их можно перечислить одно за другим; система переходит из одного состояния в другое скачком), так и с непрерывными состояниями

(система плавно переходит из состояния в состояние). Между указанными системами жесткой границы нет.

Такое моделирование эффективно использовалось для повышения безопасности функционирования объектов повышенного риска (ядерная энергетика, базы и арсеналы, уничтожение и хранение вредных веществ [1...6]). Очевидна возможность использования такого подхода при анализе *прогрессирующего (лавинообразного) обрушения зданий и сооружений*.

Частным случаем марковских процессов со счетным множеством состояний являются стохастические ветвящиеся процессы. Они определяются на основе декомпозиции системы на отдельные функциональные модули и исследования деятельности объекта с учетом межмодульных взаимодействий.

Для вероятности перехода

$$(m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_j, \dots, m_n) \rightarrow (m_1, m_2, \dots, m_i + 1, \dots, m_j - 1, \dots, m_n)$$

системы из состояния в момент времени t в состояние, соответствующее моменту времени $t + \Delta t$, справедливо:

$$P_{ij} = \alpha_{ij} m_i n_j \Delta t + 0(\Delta t); \quad i, j = 1, 2, \dots, n;$$

m_i – число элементов (блоков), которые в момент времени t находятся в состоянии S_i .

Также для перехода

$$(m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_j, \dots, m_n) \rightarrow (m_1, m_2, \dots, m_i - 1, \dots, m_j, \dots, m_n)$$

соответствующая вероятность

$$P_i = \beta_i m_i \Delta t + 0(\Delta t); \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Полагая, что в момент времени t в состоянии S_k находятся $\mu_k(t) = m_k$ элементов, ветвящийся процесс можно описать случайным вектором

$$\mu(t) = (\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_n(t)).$$

В качестве иллюстрации приведем результаты оценки риска от деятельности системы на основе определения вероятностных переходов (рис. 1) в системе, состоящей из трех модулей (рис. 2).

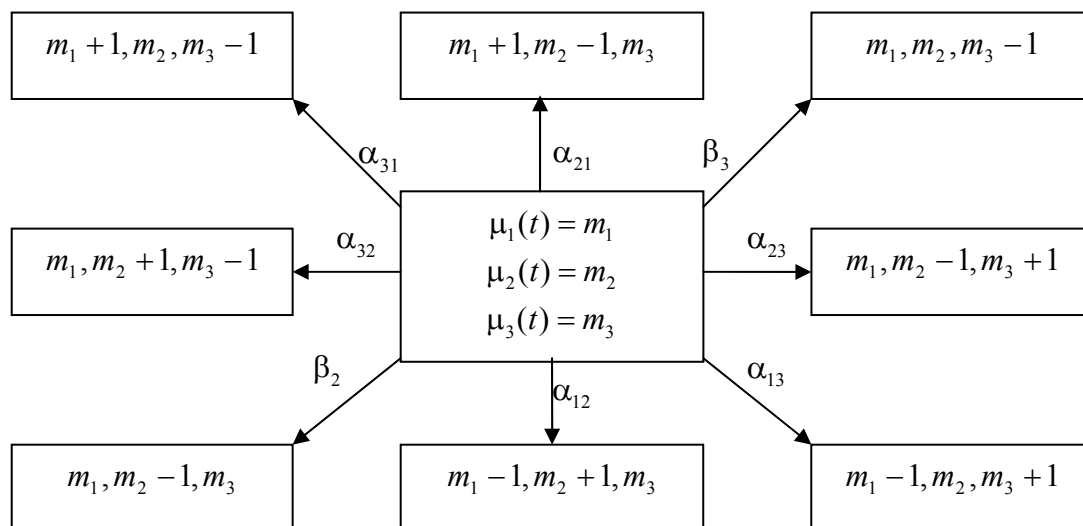


Рис. 1. Вероятностные переходы

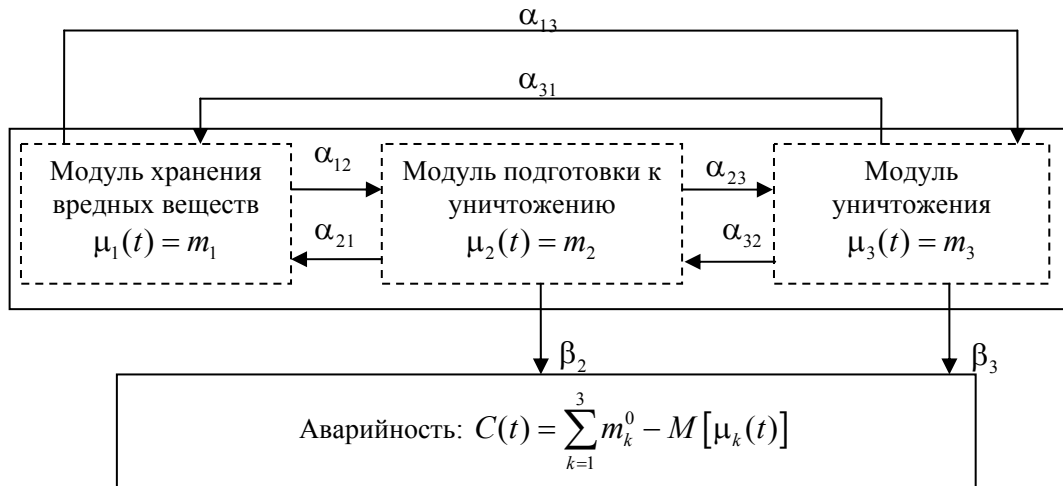


Рис. 2. Схема функционирования системы

Как видим, управление безопасностью объекта сводится к определению значений $\alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{23}, \alpha_{32}, \alpha_{13}, \alpha_{31}, \beta_2, \beta_3$ как функций времени; минимальные и максимальные их значения (см. таблицу) использовались в качестве ограничений на управление $U(t)$.

Минимальные и максимальные значения α_{ij}, β_i

	α_{12}	α_{21}	α_{23}	α_{32}	α_{13}	α_{31}	β_2	β_3
min	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$
max	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Можно показать, что для общего случая справедливо:

$$F(t, x_1, x_2, \dots, x_n) = M[x_1^{\mu_1(t)} x_2^{\mu_2(t)} \dots x_n^{\mu_n(t)}];$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \left(\alpha_{ij} (x_i^2 - x_i x_j) \frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} + \beta_i (1 - x_i) \frac{\partial F}{\partial x_i} \right), \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i \neq j, \\ 0 & \text{при } i = j. \end{cases}$$

Из этого следует:

$$\frac{dP_s}{dt} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ij} (\alpha_{ij} (m_i - 1)(m_j + 1) P_q + \beta_i (m_i + 1) P_r - (\alpha_{ij} m_i m_j - \beta_i m_i) P_s).$$

В общем случае $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(t), \beta_i = \beta_i(t)$.

Получили задачу оптимального управления ветвящимся марковским процессом: определить траекторию вероятностей $P(t)$ и управление $U(t)$, доставляющее минимум функционалу

$$J(P, U) = \int_{t_0}^T C(t, P, U) dt$$

при условиях:

$$\frac{dP}{dt} = f(t, P, U), P(t_0) = P_0, P(T) = P_T;$$

$$P = (P_1, P_2, \dots, P_s, \dots, P_m), U = (\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{ij}, \dots, \alpha_{nn}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_n).$$

В соответствии с принципом максимума Понтрягина оптимальное управление $\mathbf{U}(t)$ при каждом t доставляет абсолютный максимум функции

$$H(\tilde{\mathbf{U}}) = \max_{\mathbf{U} \in Q} H(\mathbf{U}) = \max_{\mathbf{U} \in Q} \left[\sum_{i=1}^m \psi_i f_i(t, \mathbf{P}, \mathbf{U}) - C(t, \mathbf{P}, \mathbf{U}) \right],$$

$$\Psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_s, \dots, \psi_m).$$

Справедливо:

$$\frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial P_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

На рис. 3 и 4 приводятся результаты оптимизации управления для трехмодульной системы в Matlab с использованием функционала

$$J(\mathbf{P}, \mathbf{U}) = \int_{t_0}^T \left(\sum_{k=1}^3 m_k^0 - M[\mu_k(t)] \right) dt$$

по принципу максимума Понтрягина.

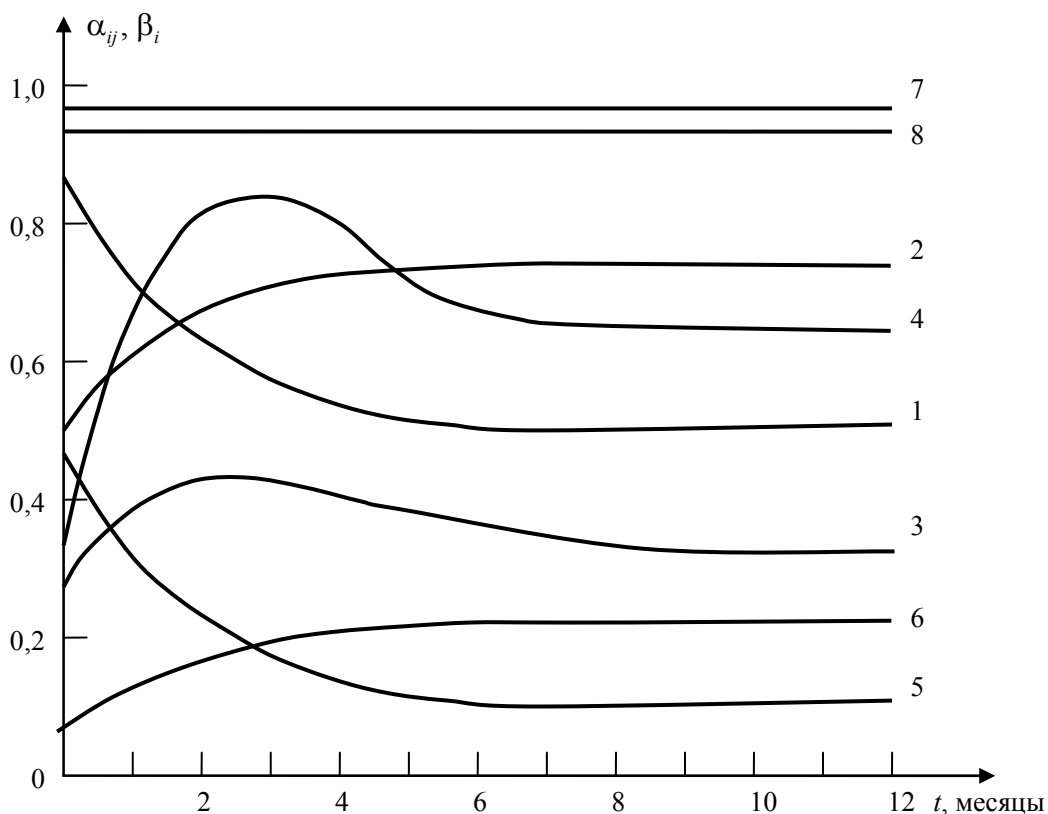


Рис. 3. Оптимальное управление:

$$\mathbf{U}(t) = (\alpha_{12}(t), \alpha_{21}(t), \alpha_{23}(t), \alpha_{32}(t), \alpha_{13}(t), \alpha_{31}(t), \beta_2(t), \beta_3(t)):$$

1 – $10^{-2} \alpha_{12}(t)$; **2** – $10^{-3} \alpha_{21}(t)$; **3** – $10^{-2} \alpha_{23}(t)$; **4** – $10^{-3} \alpha_{32}(t)$; **5** – $10^{-3} \alpha_{13}(t)$;
6 – $10^{-3} \alpha_{31}(t)$; **7** – $10^{-6} \beta_2(t)$; **8** – $10^{-5} \beta_3(t)$; $m_1^0 = 250$, $m_2^0 = 0$, $m_3^0 = 0$

Принималось:

$$C(t, \mathbf{P}, \mathbf{U}) = \sum_{k=1}^3 m_k^0 - M[\mu_k(t)].$$

Краевое условие

$$P(t_0) = \begin{cases} 1 & \text{при } m_1 = m_1^0, m_2 = m_2^0, m_3 = m_3^0 \\ 0 & \text{при } (m_1, m_2, m_3) \neq (m_1^0, m_2^0, m_3^0) \end{cases}$$

определяет начальное состояние объекта; краевое условие

$$P(T) = \begin{cases} 1 & \text{при } (m_1, m_2, m_3) = (0, 0, m_1^0 + m_2^0 + m_3^0) \\ 0 & \text{при } (m_1, m_2, m_3) \neq (0, 0, m_1^0 + m_2^0 + m_3^0) \end{cases}$$

определяет конечное состояние объекта.

Оказалось, что при стационарном управлении

$$\alpha_{12}^0 = \alpha_{12}(12), \alpha_{21}^0 = \alpha_{21}(12), \alpha_{23}^0 = \alpha_{23}(12), \alpha_{32}^0 = \alpha_{32}(12),$$

$$\alpha_{13}^0 = \alpha_{13}(12), \alpha_{31}^0 = \alpha_{31}(12), \beta_2^0 = \beta_2(12), \beta_3^0 = \beta_3(12),$$

а $C(2,5) = 0,135$.

Оптимальному управлению соответствует

$$C_{\max}(t) = C(2,5) = 0,025,$$

$$P\{\mu_1(t) + \mu_2(t) + \mu_3(t) \neq 250 \mid \mu_1(0) = 250, \mu_2(0) = 0, \mu_3(0) = 0\} < 10^{-4}.$$

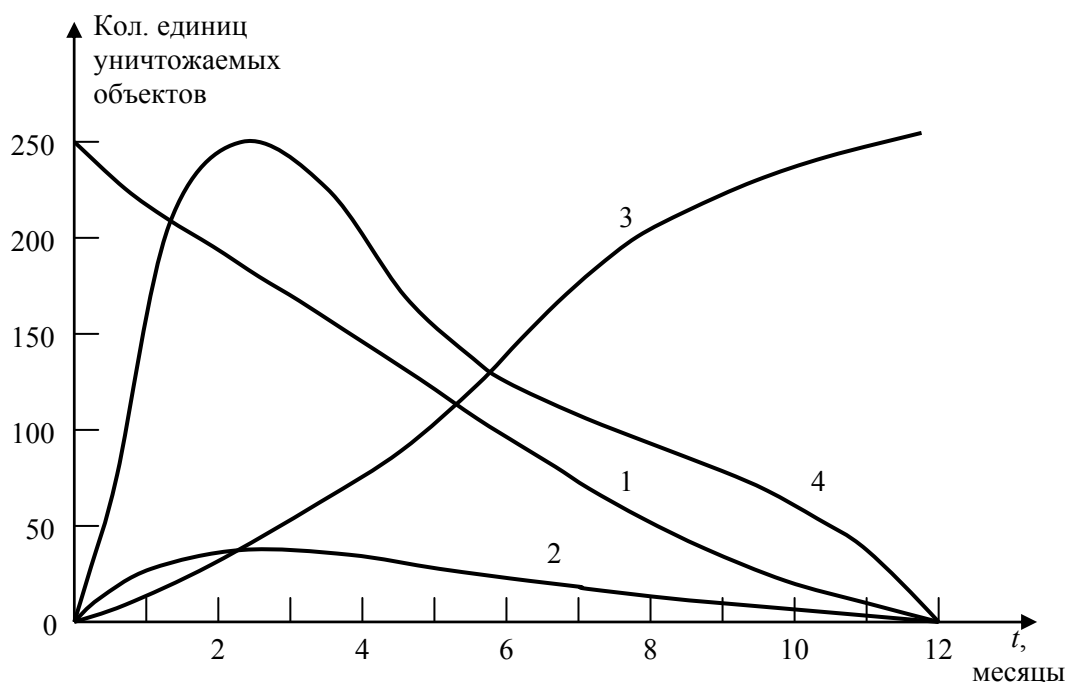


Рис. 4. Оценка функционирования системы:
 1 – $M[\mu_1(t)]$; 2 – $M[\mu_2(t)]$; 3 – $M[\mu_3(t)]$; 4 – $10^{-4}C(t)$

Результаты использовались в качестве начального приближения для уточнения результатов по известным методам спуска.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Э.В. Лапшин, Н.К. Юрков // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – №1. – С.3–11.

2. Голованов, О.А. Математическое моделирование процесса развития и исхода противотеррористической операции на базах хранения боеприпасов и средств поражения / О.А. Голованов, Ю.Г. Яшин, А.М. Данилов, С.А. Курков // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2006. – № 2. – С. 37.
3. Данилов, А.М. Обобщенная математическая модель управления безопасностью арсеналов и баз хранения боеприпасов / А.М. Данилов, О.А. Голованов, / И.А. Гарькина, А.А. Плющ // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 1. – С. 241–246.
4. Гарькина, И.А. Математическое моделирование аварий на объектах повышенной опасности / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2019. – № 1 (8). – С. 64–67.
5. Данилов, А.М. Приложения системных методологий, теорий идентификации и управления: безопасность объектов повышенного риска / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Исследования технических наук. – 2011. – Т. 3, № 2 (2). – С. 3–09.
6. Данилов, А.М. Принципы системного анализа в проектировании сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Дневник науки. – 2017. – № 8 (8). – С. 5.

References

1. Garkina, I.A. System methodologies, identification of systems and control theory: industrial and aerospace applications / I. A. Garkina, A. M. Danilov, E. V. Lapshin, N. K. Yurkov // News of universities. Volga region. Technical science. – 2009. – №. 1. – P.3–11.
2. Golovanov, O.A. Mathematical modeling of the development process and the outcome of the anti-terrorist operation on the bases of storage of ammunition and weapons / O.A. Golovanov, Yu.G. Yashin, A.M. Danilov, S.A. Kurkov // Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences. – 2006. – №. 2. – P. 37.
3. Danilov, A.M. A generalized mathematical model for managing the security of arsenals and ammunition storage bases / A.M. Danilov, O.A. Golovanov, I.A. Garkina, A.A. Pluyshc // News of Khmel'nitsky National University. Technical sciences. – 2007. – №. 1. – P. 241–246.
4. Garkina, I.A. Mathematical modeling of accidents at high hazard facilities / I.A. Garkina, A.M. Danilov // PGUAS Bulletin: construction, science and education. – 2019. – №. 1 (8). – P. 64–67.
5. Danilov, A.M. Applications of system methodologies, identification and management theories: safety of high-risk objects / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Studies of technical sciences. – 2011. – Vol. 3, № 2 (2). – P. 3–09.
6. Danilov, A.M. The principles of system analysis in the design of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Science Bulletin. – 2017. – №. 8 (8). – P. 5.

УДК 624.072.22

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

Зернов Владимир Викторович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»

Зайцев Михаил Борисович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Zernov Vladimir Victorovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Mechanics»

Zaitsev Mihail Borisovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Mechanics»

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ КОЛОНН ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СТАДИИ

В.В. Зернов, М.Б. Зайцев

Представлена методика определения несущей способности внецентренно сжатых колонн двутаврового сечения из условия устойчивости в упругопластической стадии работы. Показаны необходимые зависимости и алгоритм нахождения глубины упругого ядра сечения и величины критической нагрузки.

Ключевые слова: внецентренно сжатая колонна, двутавровое сечение, упругое ядро, упругопластическая стадия, односторонняя текучесть, критическая нагрузка, несущая способность

METHOD FOR DETERMINING THE BEARING CAPACITY OFF-CENTER COMPRESSED COLUMNS OF INDUSTRIAL BUILDINGS IN THE ELASTIC-PLASTIC STAGE

V.V. Zernov, M.B. Zaitsev

A method for determining the load-bearing capacity of off-center compressed I-beam columns from the stability condition to the elastic-plastic stage of operation is presented. The necessary dependencies and algorithm for determining the depth of the elastic core of the section and the critical load are shown.

Keywords: off-center compressed column, I-beam section, elastic core, elastic-plastic stage, one-way fluidity, critical load, bearing capacity

Известно, что несущая способность рамных каркасов промышленных зданий определяется потерей устойчивости в упругопластической стадии [1–3]. При этом в характерных сечениях колонн наблюдается односторонняя текучесть с глубиной упругого ядра $a = \alpha \cdot h$ (рис. 1). Только при малых эксцентриситетах (продольных сил) наблюдается двусторонняя текучесть.

Для двутаврового сечения при односторонней текучести с использованием диаграммы Прандтля получаем формулы для коэффициентов приведения k' (1-е расчетное сечение) и k'' (2-е расчетное сечение), которые можно использовать при практических расчетах по определению несущей способности. Эти коэффициенты зависят от напряженного состояния сечения, которое характеризуется напряжением средних волокон $\sigma_0 = \sigma_N$ и глубиной упругого ядра a .

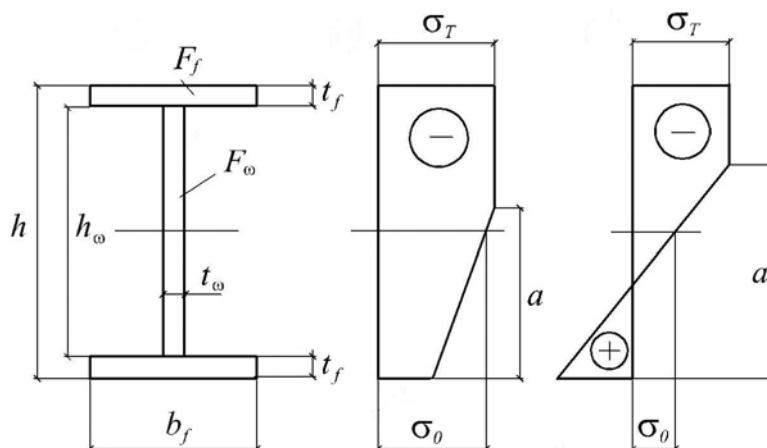


Рис. 1. Эпюры напряжений при односторонней текучести

Поставим задачу нахождения общего аналитического решения по определению глубины упругого ядра в наиболее напряженном сечении для случая внецентренно сжатой стойки, сечение которой представлено на рис. 1.

Уравнение равновесия внешних и внутренних моментов в сечении посередине высоты стойки имеет вид:

$$M = N(e_0 + f) = A \cdot h(\sigma_T - \sigma_N)\xi, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения и глубины a .

Для сечения с двумя осями симметрии в виде двутавра (прокатного или составного) этот коэффициент можно выразить через известные геометрические параметры:

$$\xi = \frac{I}{Ah^2/2} \cdot \frac{1 + 2\beta_1}{\alpha + 2\beta_1} = \frac{W_{пл}}{Ah} \left(\frac{x^0}{\chi} \right), \quad (2)$$

где W_y – упругий момент сопротивления, $x^0 = W_y / W_{пл} < 1$; A – площадь сечения; $\alpha = a \cdot h$ – относительная глубина упругого ядра; $\beta_1 = A_f / A_w$ – коэффициент формы сечения; χ – коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций в сечении при односторонней текучести.

Подставляя в (1) выражения ξ и f , получаем зависимость для определения α :

$$m\chi = \left(\frac{N_T}{N} - 1 \right) \left(1 - \frac{N}{N_{кр}^y \cdot k'} \right), \quad (3)$$

где $m = e_0 \cdot A / W_y$ – относительный эксцентриситет силы N .

Выражения для расчетных коэффициентов в рассматриваемом сечении стойки имеют вид [4]:

$$\begin{aligned} k' &= \frac{-2\alpha^3 + 3\alpha^2 + 6\beta_1\alpha}{(1 + 6\beta_1)}; \\ k'' &= \frac{\alpha^3(\alpha + 4\beta_1) \cdot (1 + 2\beta_1)}{(\alpha + \beta_1) \cdot (1 + 6\beta_1)}; \\ \chi &= \frac{\alpha(1 + 6\beta_1) \cdot (\alpha + 2\beta_1)}{(-2\alpha^3 + 3\alpha^2 + 6\beta_1\alpha) \cdot (1 + 2\beta_1)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив выражения k' и χ в уравнение (3), получим сложное уравнение четвертой степени относительно неизвестного α .

Для двутавровых сечений (как для прокатных, так и для составных) обычно $\beta_1 = A_f / A_w \geq 0,5$. Допустим, что $\beta_1 = 0,5$ и тогда выражения (4) для коэффициентов расчетных сечений упрощаются без особых погрешностей.

Подставив в выражение (3) упрощенные значения k' и χ , получим несложное квадратное уравнение относительно α .

$$\alpha^2 - \left[\frac{(1+2\beta_1)}{m} \left(\frac{N_T}{N} - 1 \right) - 2\beta_1 \right] \alpha + \frac{(1+2\beta_1)}{m} \left(\frac{N_T}{N} - 1 \right) \frac{N}{N_{кр}^y} = 0. \quad (5)$$

Решая уравнение, находим

$$\alpha_{1,2} = \frac{1}{2} \left[n_T \frac{\beta_0}{m} - 2\beta_1 \right] \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(n_T \frac{\beta_0}{m} - 2\beta_1 \right)^2 - \frac{\beta_0}{m} n_T \frac{N}{N_{кр}^y}}, \quad (6)$$

где $\beta_0 = (1 + 2\beta_1)$; $N_T = \sigma_T \cdot A$; $n_T = \left(\frac{N_T}{N} - 1 \right)$.

Формула (6) будет давать два значения α . Это объясняется тем, что кривая равновесных состояний (рис. 2) имеет нисходящую ветвь с наибольшим значением $N = N_{кр}$.

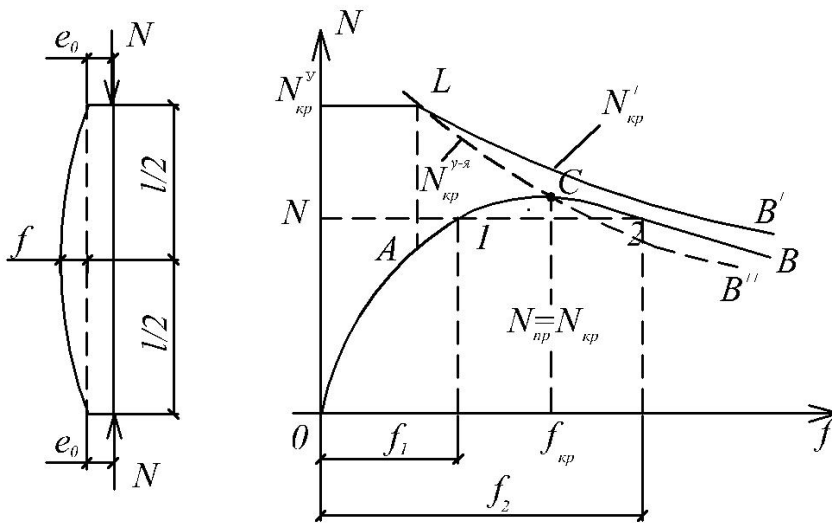


Рис. 2. Кривая равновесных состояний

Можно показать, что восходящей ветви кривой соответствует $N < N_{кр}$ и $f_1 < f_2$. Проверкой правильности полученных результатов является условие односторонней текучести сечения

$$N / N_T \geq (\alpha - \chi).$$

Предельное (критическое) значение продольной силы для рассматриваемой стойки (см. рис. 2) можно получить из равенства (5). Критическому состоянию соответствует экстремальная точка на кривой $N - f$, для которой

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{кр}.$$

Этому условию соответствует следующее равенство из (6):

$$\frac{\beta_0}{m} \left(\frac{N}{N_T} - 1 \right) \frac{N}{N_{кр}^y} - \frac{1}{4} \left[\frac{\beta_0}{m} \left(\frac{N_T}{N} - 1 \right) - 2\beta_1 \right]^2 = 0. \quad (7)$$

При этом (в критическом состоянии) относительная глубина упругого ядра будет определяться равенством

$$\alpha_1 = \alpha_1 = \alpha_{кр} = \frac{1}{2} \left[\frac{\beta_0}{m} \left(\frac{N_T}{N} - 1 \right) - 2\beta_1 \right]. \quad (8)$$

Уравнение (7) относительно неизвестного $N_{кр}$ получается квадратным и может быть решено в общем виде. Его можно решить и методом попыток, задаваясь искомой силой $N_{кр}$. Проверкой правильности решения этого уравнения и фактически всех вычислений служит равенство

$$N_{кр} = N_{кр}^{y-я} = N_{кр}^y \cdot k'' = N_{пр}, \quad (9)$$

где $N_{кр}^y = \pi^2 EI / l^2$ – в упругой стадии работы.

На рис. 2 кроме кривой равновесных состояний ОАСВ для внецентренно сжатой колонны приведены еще другие характерные значения продольных сил. Величины $N_{кр}^I$ и $N_{кр}^{II} = N_{кр}^{y-я}$ выражаются через приведенные коэффициенты k^I и k^{II} , зависящие от α и соответственно от характерного поперечного прогиба f .

Для облегчения вычислений коэффициента жесткости второго расчетного сечения k^{II} построены графики зависимости (рис. 3) этого коэффициента от α с использованием уточненной формулы (4).

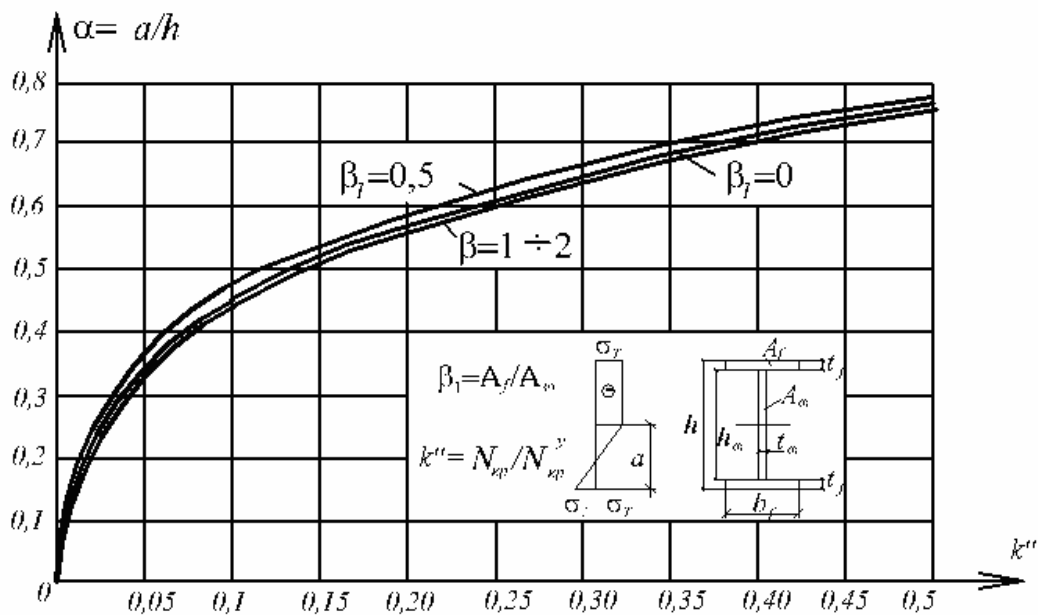


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента жесткости k^{II} от α

По этому графику видно, что, действительно, при $\beta_1 = A_f / A_0 \geq 0,5$ значение k^{II} практически не зависит от β_1 . На рис. 4 приведены графики зависимости коэффициента k^{II} от α , построенные по формуле (4), но без множителя $(1 + 2\beta_1)$, как в [4].

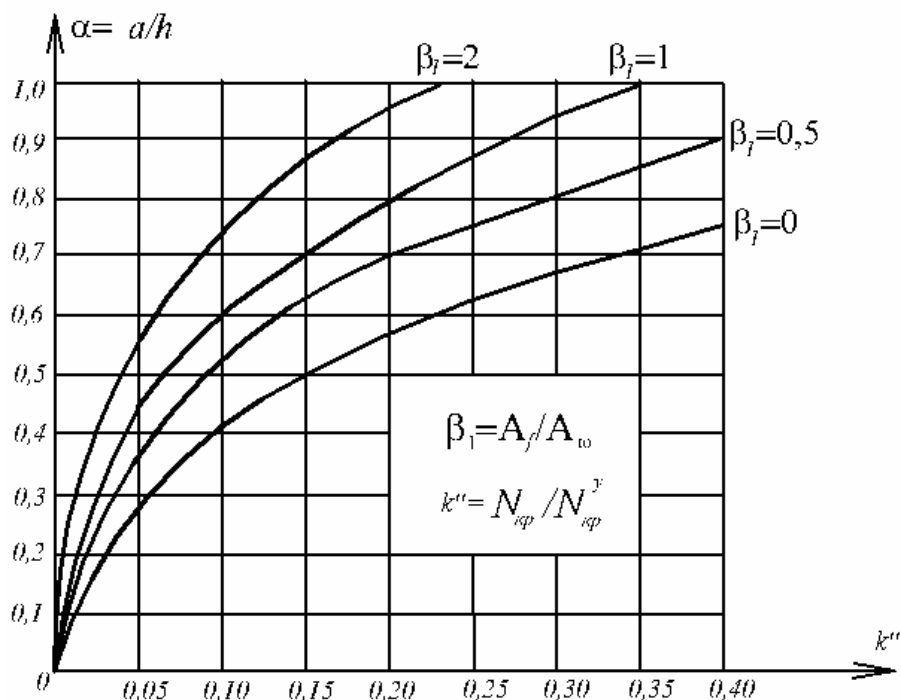


Рис.4. Графики зависимости коэффициента жесткости k'' от глубины упругого ядра α по приближенным зависимостям

Заметим, что без этого множителя значение k'' получается значительно меньше, поэтому не удовлетворяется равенство (9), т.е. на кривой равновесных состояний (см. рис. 2) не пересекаются кривые $OACB$ и LB'' в точке C .

Полученные выше формулы для определения упругого ядра и критической силы для внецентренно сжатой стойки с шарнирно-закрепленными концами применимы и для ступенчатой стойки. Для таких стоек в этих формулах значения $N''_{кр}$ следует определить по обобщенной формуле Эйлера, которая для верхней ветви колонны может быть представлена в виде

$$N''_{2кр} = v_{2кр}^2 EI_2 / h_2^2,$$

где $v_{2кр}$ определяется из раскрытия общего определителя

$$D(v) = D[r_{jk}(i_{jk}, v_k)].$$

Выводы

1. Предлагается методика определения несущей способности внецентренно сжатых колонн двутаврового сечения из условия устойчивости в упругопластической стадии работы на основе нахождения глубины упругого ядра сечения.

2. Полученные зависимости для определения упругого ядра и критической силы для внецентренно сжатой колонны с шарнирно-закрепленными концами могут быть использованы и для ступенчатых колонн.

Список литературы

1. Зернов, В.В. Анализ устойчивости стержневых систем в упругопластической стадии работы / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Ю.В. Анурьева // Моделирование и механика конструкций. – 2017. – №6. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/nob/stroitel'naya-mehnika/6.4/at_download/file

2. Раевский, А.Н. Проверка несущей способности металлических ферм с учетом искривлений отдельных элементов / А.Н. Раевский, М.Б. Зайцев // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 12. – С. 4–9.

3. Зернов, В.В. Определение критической нагрузки для стропильных ферм в упругой и упругопластической стадиях работы / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Н.Н. Ласков // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 85–89.
4. Геммерлинг, А.В. Несущая способность стержневых стальных конструкций / А. В. Геммерлинг. – М.: Госстройиздат, 1958. – 207 с.
5. Монахов, В.А. Методы численного расчета сжатых стержней на устойчивость / В.А. Монахов, М.Б. Зайцев, Д.А. Бураева // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №4. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/stroitel'naya-mehanika/4.5/at_download/file
6. Зернов, В.В. Определение предельной нагрузки для сжатого искривленного стержня фермы с учетом развития пластических деформаций сечения и реальных условий закрепления в узлах / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2015. – №2. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no2/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/2.17/at_download/file.

References

1. Zernov, V.V. Analysis of stability of rod systems in the elastic-plastic stage of work / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, Yu.V. Anurieva // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – No. 6. – Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitel'naya-mehanika/6.4/at_download/file
2. Raevsky, A.N. Checking the bearing capacity of metal trusses with regard to the curvature of individual elements / A.N. Raevsky, M.B. Zaitsev // University news. Construction. – 1999. – № 12. – P. 4-9.
3. Zernov, V.V. Determination of the critical load for trusses in elastic and elastic-plastic stages of work / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, N.N. Laskov // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 4. – P. 85–89.
4. Gemmerling, A.V. Bearing capacity of rod steel structures / A.V. Gemmerling. – Moscow: Gosstroyizdat, 1958. – 207 p.
5. Monakhov, V.A. Methods of numerical calculation of compressed rods for stability / V.A. Monakhov, M.B. Zaitsev, D.A. Buraeva // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – №4. – Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/stroitel'naya-mehanika/4.5/at_download/file
6. Zernov, V.V. Determination of the maximum load for a compressed curved truss rod taking into account the development of plastic deformations of the section and real conditions of fixing in nodes / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2015. – №2. – Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no2/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/2.17/at_download/file.

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

Баронин Сергей Александрович,
доктор экономических наук, профессор,
зав. кафедрой «Экспертиза и управление
недвижимостью»
E-mail: baron60@inbox.ru

Еремкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и
вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Пензенский государственный аграрный университет

Россия, 440014, г. Пенза ул. Ботаническая, д.30,
тел.: (8412) 62-83-59; факс: (8412) 62-81-34

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Управление, экономика и право»
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

Baronin Sergey Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Expertise and Property
Management»
E-mail: baron60@inbox.ru

Eremkin Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Heat and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Penza State Agricultural University

Russia, 440014, Penza, 30, Botanical St.,
tel.: (8412) 62-83-59; fax: (8412) 62-81-34

Ponomareva Inna Konstantinovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Management, Economics
and Law»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

РАЗВИТИЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОНТРАКТОВ НА ЖИЗНЕННЫЕ ЦИКЛЫ ПО ОБЪЕКТАМ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

С.А. Баронин, А.И. Еремкин, И.К. Пономарева

Рассмотрена методология развития объектов капитального строительства на основе контрактов на жизненные циклы при реализации национальных проектов. Актуальность данного исследования определяется важностью инновационного и энергоэффективного развития Российской Федерации на основе методологии учета полной стоимости владения в жизненных циклах товаров. Это должно обеспечивать спрос на высокотехнологичную продукцию с более высокой закупочной стоимостью, но с более низкой совокупной стоимостью владения на жизненном цикле.

Целью исследования является разработка мероприятий по управлению объектами капитального строительства на основе контрактов на жизненные циклы при реализации национальных проектов с моделированием процессов результативности и эффективности с учетом стоимости владения, которые следует рассматривать как институциональные инструменты регулирования прорывного экономического и научно-технического роста, формируемые в процессе генезиса моделей управления стоимостью.

Объектом исследования являются объекты капитального строительства на всех этапах контрактов на жизненные циклы при реализации национальных проектов. В качестве применяемых методов исследования использовалась совокупность системно взаимосвязанных методических подходов, основанных на логическом анализе, экспертных оценках, экономико-математическом моделировании и прогнозировании.

Ключевые слова: капитальное строительство, контракт жизненного цикла, энергосбережение, национальный проект, оценка стоимости, затраты

DIAGNOSTICS OF NATIONAL PROJECTS BASED ON CONTRACTS FOR LIFE CYCLES OF CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS

S.A. Baronin, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva

The article discusses the methodology of development of capital construction projects on the basis of life cycle contracts for the implementation of national projects. The relevance of this study is determined by the importance of innovative and energy-efficient development of the Russian Federation based on the methodology for accounting for the total cost of ownership in the life cycles of goods. This should provide demand for high-tech products with a higher purchase value, but with a lower total cost of ownership in the life cycle.

The aim of the study is to develop recommendations for the management of capital construction projects on the basis of life cycle contracts for the implementation of national projects with modeling of processes of efficiency and effectiveness taking into account the cost of ownership, which should be considered as institutional tools for regulating breakthrough economic, scientific and technological growth, formed in the process of genesis cost management models.

The object of the study are capital construction projects at all stages of life cycle contracts during the implementation of national projects. As applied research methods, a set of systemically interconnected methodological approaches based on logical analysis, expert estimates, economic and mathematical modeling and forecasting was used.

Keywords: capital construction, life cycle contract, energy saving, national project, cost estimation, costs

Стратегической национальной задачей России в настоящее время является обеспечение прорывного научно-технологического и социально-экономического развития страны. Это формирует нетривиальное исследовательское поле, связанное с необходимостью запуска инновационных инвестиционных циклов развития страны с учетом обеспечения максимальных темпов воспроизводства объектов капитального строительства.

Президентом России в настоящее время ставится весьма сложная задача – обеспечить выход на ежегодные темпы прироста инвестиций не ниже пяти процентов, а с 2021 года достичь темпов экономического роста выше мировых, в том числе сформировать устойчивый качественный рост ВВП с учетом факторов внешних вызовов и рисков. Весьма амбициозные национальные стратегии развития России, сформулированные президентом РФ Путиным В.В. указом №204 от 7 мая 2018 [1], предусматривают вхождение России в число пяти крупнейших экономик мира, обеспечение темпов экономического роста выше мировых при сохранении макроэкономической стабильности, ускорение технологического развития, создание в базовых отраслях экономики высокопроизводительного экспортно ориентированного сектора.

Авторские исследования показывают, что проблематика прорывного научно-технологического и социально-экономического развития государств, отраслей, инвестиционных программ, проектов и производственных кластерных систем требует обязательного решения вопросов обеспечения одновременного синхронного ускоренного воспроизводства объектов капитального строительства. Это, в свою очередь, актуализирует проведение специализированных фундаментальных и поисковых исследований организационно-технического, социально-экономического и управленческого характера по применению инновационных институциональных инструментов существенной активизации управления ускоренным строительством объектов недвижимости различных типов.

При этом главным национальным институциональным инструментом реализации такой прорывного развития является выполнение национальных проектов. Их эффективную реализацию следует признать главным звеном выполнения стратегии прорывного научно-технологического и социально-экономического развития России. Именно их реализация должна инициировать инновационный и результативный градиенты существенного роста экономики России на основе высокоэффективного капитального строительства.

Учитывая высокий уровень неопределенности, значительную мультиформатность и востребованность проявления такого феномена, как прорывное научно-технологическое и социально-экономическое развитие на основе реализации национальных проектов, предлагается выделить одно из ключевых направлений обеспечения этой национальной стратегии – управление объектами капитального строительства и недвижимости в процессе их воспроизводства как ключевыми элементами национального богатства страны.

Именно поэтому в качестве объекта исследования предлагается использовать процессы управления жизненными циклами объектов капитального строительства и недвижимости в процессе их воспроизводства при реализации таких национальных проектов, как «Жилье и городская среда» и «Безопасные и качественные автомобильные дороги», а также в прочих инвестиционно-строительных компонентах нацпроектов, где выделяются бюджетные средства на объекты капитального строительства.

Основная проблемная ситуация при реализации национальных проектов в рамках воспроизводства объектов капитального строительства, по нашему мнению, заключается в действии двух основных взаимоисключающих тенденций:

- *во-первых*, это стратегический национальный приоритет необходимости повышения уровня энергоэффективности, энергосбережения, важности увеличения применения технологий, материалов и научно-технической продукции инновационного характера. Этот приоритет требует значительных дополнительных инвестиционных ресурсов;

- *во-вторых*, это стратегический национальный приоритет экономии бюджетных средств при формировании государственных контрактов, сокращения стоимости инвестиционных проектов и объектов капитального строительства в процессе воспроизводства всех типов недвижимости. Это требует ввода достаточного количества доступного жилья, в том числе социального типа, а также сокращения себестоимости строительства капитальных объектов всех типов в рамках реализации национальных проектов.

Исследование показало, что в трудах российских ученых весьма широко изучаются вопросы многогранного развития управления воспроизводством объектов капитального строительства различных типов по организационно-техническим, технологическим, экономическим, энергоэффективным и управленческим направлениям. Об этом свидетельствуют труды С.А. Баронина [2], П.Г. Грабового [3], К.П. Грабового [4], Г.М. Загидуллиной [5], С.П. Коростелева [6], К.Ю. Кулакова [7], И.Г. Лукмановой [8], А.И.Еремкина [9] и пр. Также известны многочисленные работы зарубежных специалистов, касающиеся методик расчета на основе анализа стоимости затрат объектов в жизненных циклах строительства (А. Боусбейн, Р. Брэн, Д. Бул, Г. Девулф, Б. Дхилон, Д. Фэнин и др.).

Выполненный обзорный анализ позволил сформулировать рабочую гипотезу исследования, которая предполагает, что решение сформулированной выше проблемной ситуации возможно и целесообразно на основе применения концептуального подхода по управлению стоимостью контрактов на жизненные циклы объектов капитального строительства и недвижимости в процессе их воспроизводства с учетом приоритетного применения в них идеологии энергоэффективности, энергосбережения, увеличения количества используемых технологий, материалов и научно-технической продукции инновационного характера с учетом обязательного моделирования и управления минимизацией стоимости владения для конечных потребителей и собственников

В связи с этим была поставлена цель по разработке теоретических положений и получению новых эмпирических знаний по моделированию стратегий управления жизненными циклами объектов капитального строительства и недвижимости в процессе их воспроизводства при реализации национальных проектов на основе оценки стоимости контрактов на жизненные циклы с учетом стоимости владения, которые следует рассматривать как институциональные инструменты регулирования прорыв-

ного экономического и научно-технического роста, формируемые в процессе генезиса моделей управления стоимостью.

Научная новизна данного вектора многокомпонентных исследований определяется возможностью развития фундаментальных и поисковых исследований в области моделирования феномена государственной национальной стратегии прорывного научно-технологического и социально-экономического развития на основе приоритетной реализации национальных проектов по ключевым направлениям инвестиционной деятельности воспроизводства объектов капитального строительства: жилая недвижимость; городская среда; инфраструктурные проекты типа автомобильных дорог. Именно к данным типам объектов капитального строительства, которые одновременно являются и нашими объектами исследования, предполагается применение современных теорий и методологий стоимостного моделирования и управления стоимостью контрактов на жизненные циклы объектов капитального строительства с учетом минимизации стоимости владения этой недвижимостью.

Применение методологии управления стоимостью контрактов на жизненные циклы с учетом применения теории стоимости владения рассматривается авторами как современный институциональный инструмент регулирования прорывного экономического роста.

Авторские исследования показали, что в российской теории и практике оценочной и инвестиционно-строительной деятельности наступил период, когда наряду с основными применяемыми видами стоимости, такими, как рыночная, инвестиционная, ликвидационная и кадастровая, появилась потребность перейти к ее новым разновидностям – оценке объектов капитального строительства как стоимости жизненных циклов товаров (систем), оценке стоимости владения для конкретных субъектов владения за расчетные периоды владения, а также стоимости контрактов на жизненные циклы.

Важность актуализации выделения особого направления оценочной деятельности применительно к определению стоимости жизненных циклов товаров и работ, стоимости владения ими для конечных пользователей, а также формализации процедур управления такими видами стоимостей в различных системах менеджмента и государственного регулирования объектов капитального строительства весьма очевидна. И она связана с активным развитием в мировой экономике глобального мирового экономического тренда управления товарами и различными объектами собственности во всех сферах народного хозяйства на основе моделирования их как жизненных циклов, имеющих свою стоимость.

Современный тренд управления капитальными объектами – это планирование и минимизация не только классической цены приобретения товара, но и последующих затрат владельца в период эксплуатации вплоть до ликвидации (утилизации). Именно совместное рассмотрение стоимости приобретения объектов капитального строительства (стоимости в обмене) и их стоимости в период эксплуатации на определенном периоде владения позволяет получать как стоимость их жизненных циклов, так и стоимость владения данными товарами (системами) как дискретную величину владения для конкретных субъектов владения.

Проведенные исследования показывают обоснованность и целесообразность планирования при реализации данных прорывных стратегических направлений использования методологии госрегулирования воспроизводства объектов капитального строительства на основе стоимости жизненных циклов и стоимости владения жизненными циклами. Это должно стать главной целевой функцией эффективности социально-экономических систем, в том числе и по объектам капитального строительства. Нам необходимо минимизировать не только стоимость товара как уровень затрат на его создание и приобретение, но и стоимость владения этим товаром на весь жизненный цикл его экономического использования и владения [10].

Исследованиями установлено, что 2013 г. стал точкой отчета применения оценки стоимости жизненных циклов в российской экономике, что связано с развитием процедур государственного регулирования в области госзаказа. Это стало возможным

благодаря принятию Федерального закона №44-ФЗ о закупках товаров для государственных и муниципальных нужд [11]. Это законодательное поле впервые начало формировать контрактную модель приоритетного стимулирования инновационной и высокотехнологической продукции в сфере закупок для государственных и муниципальных нужд на основе выделения критерия стоимости контракта на жизненный цикл. Этот подход реализован через систему контрактных критериев. Вместо одного главного критерия – цены контракта (как было ранее) – были установлены следующие: 1) цена контракта; 2) затраты на эксплуатацию и ремонт; 3) качественные и экологические характеристики; 4) квалификация участников; 5) наличие финансовых и материальных ресурсов; 6) опыт работы и деловая репутация. Если сложить два первых критерия, то они представят собой стоимость контракта на жизненный цикл любых типов товаров и работ, в том числе и на объекты капитального строительства.

Это правовое поле предопределило переход в строительной отрасли России на контракты жизненного цикла (КЖЦ). На смену традиционным договорам подряда на строительство различных объектов приходят контракты на жизненные циклы. Так, например, КЖЦ сейчас обязательны при строительстве автомобильных и железнодорожных дорог, портов, аэродромов и прочих объектов [12]. Использование КЖЦ трансформирует использование традиционных договоров подряда с гарантийными обязательствами по видам СМР в дополнительную ответственность подрядчика (застройщика) за фактические эксплуатационные затраты построенных объектов капитального строительства, в том числе с системами гарантий и софинансирования в виде государственно-частного партнерства (ГЧП) и концессии.

На высокую актуальность данного подхода указывает тот факт, что при реализации национального проекта по автомобильным дорогам предусмотрены довольно высокие темпы роста применения модели КЖЦ в общих объемах строительства. Так, например, доля контракта на осуществление дорожной деятельности на принципах КЖЦ (объединение в один контракт не только строительства, но и капитального ремонта, содержания): 2019 г. – 10%; 2020 г. – 20%; 2022 г. – 50%; 2024 г. – 70%.

Анализ показал, что национальные проекты как институциональный инструмент прорывного развития приняты в России в 2018 году на период с 2019 г. по 2024 г. на общую сумму 25,7 трлн руб. Они разработаны по трём основным направлениям: «Человеческий капитал», «Комфортная среда для жизни» и «Экономический рост». Структура и объем финансирования национальных проектов представлены на рис.1.

В рамках исследования осуществлено теоретическое моделирование процессов влияния применения контрактов на жизненные циклы объектов капитального строительства на увеличение эффективности реализации национальных проектов. Предусматривается в качестве центрального управляемого элемента рассматривать подсистему из множества совокупностей объекта исследования как множественной совокупности объектов капитального строительства в процессе их ускоренного эффективного воспроизводства в рамках реализации национальных проектов. При этом эффективность реализации национальных проектов на основе контрактов на жизненные циклы объектов капитального строительства $\mathcal{E}_{\text{кжц}}$ рассматривается как долгосрочная стратегическая эффективность реализации национальных проектов. Она имеет, по экспертным авторским данным, по сравнению с традиционной эффективностью строительства по традиционным договорам подряда $\mathcal{E}_{\text{дп}}$ мультипликатор ускорения воспроизводства объектов капитального строительства в составе национальных проектов $M_y^{\text{НП}}$ не менее 10, что иллюстрируется формулой

$$M_y^{\text{НП}} = \mathcal{E}_{\text{кжц}} / \mathcal{E}_{\text{дп}} \geq 10. \quad (1)$$



Рис. 1. Структура и объем финансирования национальных проектов РФ на 2019–2024 годы

На сложность и неоднозначность развития моделей КЖЦ применительно к объектам капитального строительства указывают данные проведенного авторами экспертного опроса руководителей ведущих строительных организаций Пензенской области, а также государственных служащих, занятых в инвестиционно-строительной сфере. Выборочная совокупность составила 30 чел. Опросный лист разделен на 4 блока: привлекательность организационно-правовых моделей КЖЦ, выгоды и эффекты КЖЦ, риски КЖЦ и препятствия развития КЖЦ в РФ. Мнение экспертов сложилось следующим образом: высокую привлекательность организационно-правовых моделей КЖЦ при реализации национальных проектов отметили 70% опрошенных. Выгода при реализации КЖЦ по объектам капитального строительства возможна при надлежащем планировании всех процессов их реализации – ответили 65% респондентов. Высокие риски при реализации КЖЦ из-за их значительной долгосрочности выполнения, вероятности изменений технических требований контракта, цены КЖЦ, особенно в части нормативов эксплуатации объектов капитального строительства и законодательной базы, отметили 57% опрошенных экспертов. В качестве основного препятствия при реализации КЖЦ отсутствие проработанного нормативно-правового регулирования отмечают 25% экспертов. Но также при этом весьма существенно то, что 82% опрошенных отмечают низкую мотивацию руководителей, работников среднего звена и рядовых исполнителей строительных и эксплуатационных организаций перехода к работе по КЖЦ.

Также 55% респондентов уверенно констатируют, что объединение фазы строительства и этапа эксплуатации в рамках одного исполнителя может привести к увеличению монополизации и уровню концентрации на рынках. Так, например, сейчас через тендеры происходит распределение СМР на текущий и капитальный ремонт автомобильных дорог. Но если объединить в рамках одного застройщика или управляющей компании и строительство, и эксплуатацию, то это, конечно, обеспечит долгосрочную загрузку коллектива предприятия, надежность функционирования объекта капитального строительства, но может значительно уменьшить уровень конкуренции на рынке.

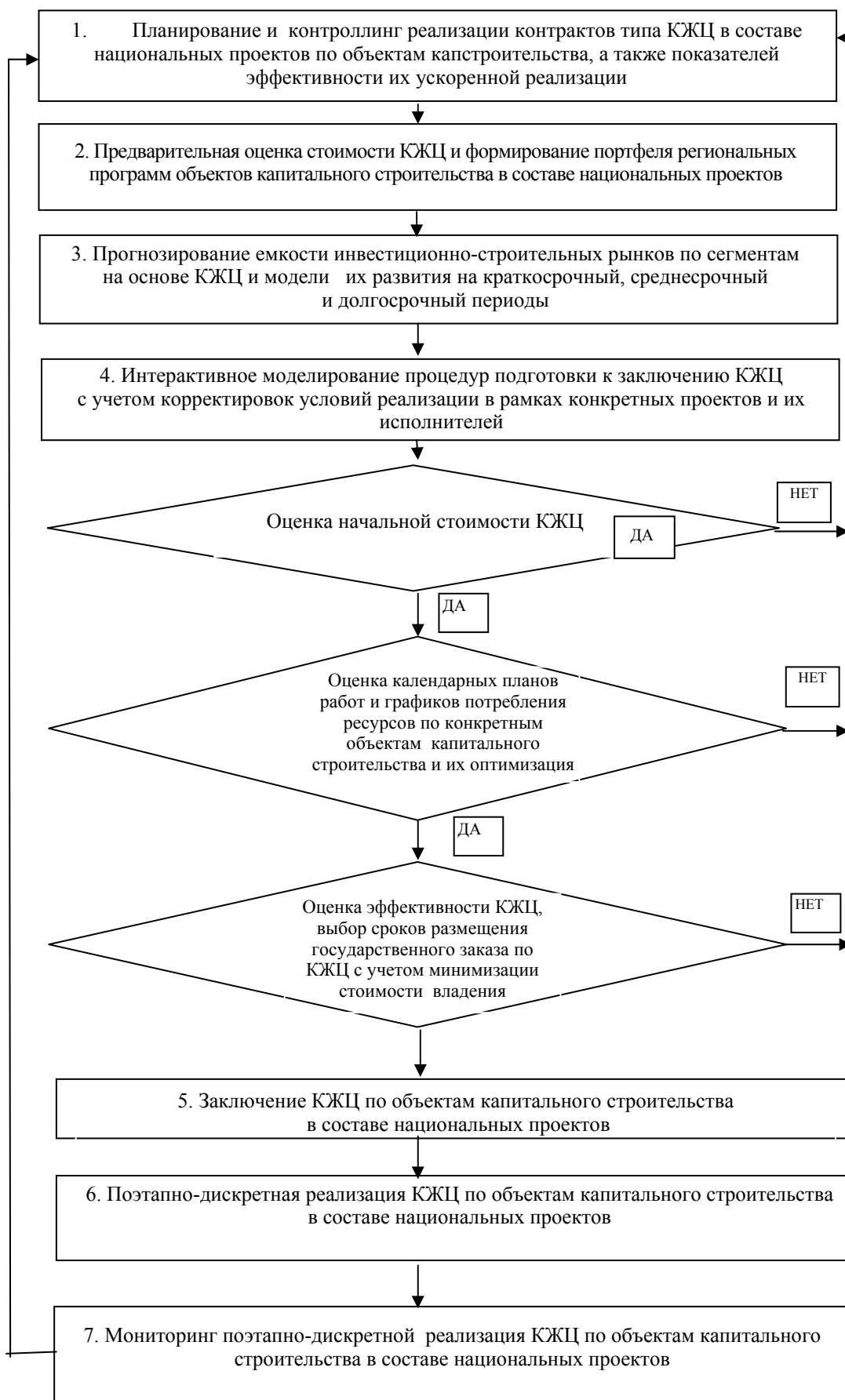


Рис. 2. Семиэтапный алгоритм процессно-целевого управления КЖЦ по объектам капитального строительства при реализации национальных проектов

В конечном счете эксперты констатируют перспективность и эффективность применения КЖЦ при реализации национальных проектов, а также необходимость дальнейшей работы по их внедрению при строительстве капитальных объектов.

Обзор зарубежного опыта показывает, что КЖЦ объектов капитального строительства хорошо зарекомендовали себя в зарубежной практике. Контрактная модель позволяет заказчику переложить все проектные, строительные и эксплуатационные риски на подрядную организацию, сконцентрироваться лишь на основных параметрах объекта и контроле достижения заданных параметров. Тем самым после ввода объекта в эксплуатацию бремя содержания полностью лежит на организации-подрядчике. Объем текущих расходов зависит от того, насколько качественно исполнители выполнили работы по проектированию и строительству, то есть стимулируется повышение качества работ на всех стадиях проекта.

В результате исследования авторами предложены мероприятия по управлению объектами капитального строительства на основе контрактов на жизненные циклы при реализации национальных проектов в виде алгоритма, представленного на рис. 2.

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность применения методологии развития объектов капитального строительства в национальных проектах на основе контрактов на жизненные циклы. Это, по авторскому мнению, может стать основой для реализации стратегической национальной задачи России по обеспечению прорывного научно-технологического и социально-экономического развития страны в условиях внешних вызовов и турбулентной экономики.

Список литературы

1. Кремль. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027>, свободный – (15.01.2020).
2. Баронин, С.А. Стоимостное моделирование жизненных циклов строительства зданий на основе совокупных затрат и оценка стоимости контрактов на жизненные циклы недвижимости / С.А. Баронин, К.Ю. Кулаков // Недвижимость: экономика, управление. – 2019. – №1. – С.32-38.
3. Мищенко, В.Я. Особенности проектирования жизненного цикла энергоэффективных объектов недвижимости / В.Я. Мищенко, П.Г. Грабовый [и др.]. – Екатеринбург, 2019.
4. Грабовый, К.П. Контрактные отношения в строительстве: зарубежный и отечественный опыт / К.П. Грабовый, В.Я. Мищенко // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 2. – С.75–86.
5. Загидуллина, Г.М. Основные направления активизации инновационной деятельности в инвестиционно-строительной сфере / Г.М. Загидуллина, Р.М. Иванова // Российское предпринимательство. – 2017. – № 21. – С.219–226.
6. Коростелев, С.П. К вопросу об эффективном управлении территориальным развитием Российской Федерации для устойчивого роста экономики / С.П. Коростелев, О.Н. Маргалитадзе, Ю.А. Чемондин, В.С. Горбунов // Московский экономический журнал. – 2019. – № 3. – С.3–8.
7. Кулаков, К.Ю. Управление инвестиционной стоимостью земельных участков при жилищном строительстве на основе государственного-частного партнерства / К.Ю. Кулаков // Экономические стратегии. – 2018. – № 3. – С.100–107.
8. Лукманова, И.Г. Новые горизонты конкурентоспособности национальной экономики / И.Г. Лукманова, Н.Ю. Яськова // Известия высших учебных заведений. – 2019. – № 2. – С.23–28.
9. Еремкин, А.И. Об энергосбережении в строительстве / А.И. Еремкин, И.Н. Фильчакина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2018. – № 5 (18). – 153–162.
10. Методические аспекты формирования и управления совокупной стоимостью жизненных циклов недвижимости с разным уровнем энергоэффективности: монография / С.А. Баронин. – Пенза, 2017. – 173 с.

11. Федеральный закон от 05.04.2013 N 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд». – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/, (15.01.2020).

12. Правительство России. – Режим доступа: <http://government.ru/projects/selection/735/35560/> (15.01.2020).

References

1. The Kremlin. – Access mode: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027>, free – (01/15/2020).

2. Baronin, S.A. Cost-based modeling of building construction life cycles based on total costs and cost estimation of contracts for real estate life cycles / S.A. Baronin, K.Yu. Kulakov // *Real Estate: Economics, Management*. – 2019. – No. 1. – P. 32–38.

3. Mishchenko, V.Ya. Features of the design of the life cycle of energy-efficient real estate / V.Ya. Mishchenko, P.G. Grabovoi [etc.]. – Yekaterinburg, 2019.

4. Grabovoi, K.P. Contractual relations in construction: foreign and domestic experience / K.P. Grabovoi, V.Ya. Mishchenko // *Scientific Journal of Construction and Architecture*. – 2017. – No. 2. – P. 75–86.

5. Zagidullina, G.M. The main directions of enhancing innovation in the investment and construction sector / G.M. Zagidullina, R.M. Ivanova // *Russian Journal of Entrepreneurship*. – 2017. – No. 21. – P. 219–226.

6. Korostelev, S.P. On the issue of effective management of the territorial development of the Russian Federation for sustainable economic growth / S.P. Korostelev, O.N. Margalitadze, Yu.A. Chemondin, V.S. Gorbunov // *Moscow Economic Journal*. – 2019. – No. 3. – P. 3–8.

7. Kulakov, K.Yu. Management of the investment value of land during housing on the basis of public-private partnership / K.Yu. Kulakov // *Economic Strategies*. – 2018. – No. 3. – P. 100–107.

8. Lukmanova, I.G. New horizons of the competitiveness of the national economy / I.G. Lukmanova, N.Yu. Yaskova // *News of Higher Educational Institutions*. – 2019. – No. 2. – P. 23–28.

9. Eremkin, A.I. About energy saving in construction / A.I. Eremkin, I.N. Filchakina // *Education and science in the modern world. Innovation* – 2018. – No. 5 (18). – P.153–162.

10. Methodological aspects of the formation and management of the total cost of the life cycles of real estate with different levels of energy efficiency: monograph / S.A. Baronin. – Penza, 2017. – 173 p.

11. Federal Law of 05.04.2013 N 44-ФЗ “On the Contract System in the Sphere of Procurement of Goods, Work, and Services to Ensure State and Municipal Needs”. – Access mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/ January 15, 2020.

12. The Government of Russia. – <http://government.ru/projects/selection/735/35560/> (01/15/2020).

УДК 69.059.032

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

ООО «МонГрад»
Россия, 440068, Пенза, ул.Терновского,
214

Лаштанкин Алексей Сергеевич,
директор
E-mail: as@mongrad.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
"MonGrad"

Russia, 440068, Penza, 214, Ternovsky St.

Lashtankin Alexey Sergeyeovich
Director
E-mail: as@mongrad.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КРАНОВЫХ АРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ

И.Н. Гарькин, А.С. Лаштанкин

Приводятся методика проведения и результаты испытаний крановых рельсов арочного профиля. Испытания проводились с целью исследования локального напряжённо-деформированного состояния арочного рельса. Доказывается, что арочные рельсы обладают амортизирующими свойствами, повышенной устойчивостью, более высокими характеристиками на изгиб и кручение при пониженной материалоемкости. Использование арочного рельса разгружает подрельсовую зону подкрановых конструкций и качественно улучшает их напряжённо-деформированное состояние.

Ключевые слова: арочный крановый рельс, подкрановые конструкции, метод испытания, строительные конструкции, выносливость, долговечность

TEST RESULTS OF CRANE ARCH RAILS

I.N. Garkin, A.S. Lashtankin

Method of conducting the test results of crane rails of an arched profile is given. The tests were carried out with the aim of studying the local stress-strain state of the arch rail. It is proved that the arch rail possesses shock-absorbing properties, increased stability, higher bending and torsion characteristics with reduced material consumption. The use of an arched rail unloads the under-rail zone of crane structures and qualitatively improves their stress-strain state.

Keywords: arched crane rail, crane structures, test method, building structures, endurance, durability

Одной из приоритетных задач в области повышения безопасной эксплуатации промышленных зданий и сооружений является разработка новых строительных конструкций с улучшенными характеристиками. Так как в промышленных зданиях с тяжелым режимом работы наиболее низкий ресурс у подкрановых конструкций [1], то очевидна необходимость создания новых способов повышения технического ресурса (выносливости) подкрановых балок, крановых рельсов, тормозных балок и др. Приведем ход и результаты испытаний арочного кранового рельса. Цель испытаний – изучить напряжённое состояние модели арочного рельса. Для реализации этой цели были поставлены следующие задачи:

- разработать крупномасштабную модель арочного рельса;
- провести статические испытания арочного рельса;

– исследовать локальное напряжённо-деформированное состояние арочного рельса.

Колесо крана, рельс и подкрановая балка работают как единый механизм, и от надёжной совместной работы частей этого механизма зависит выносливость всей подкрановой конструкции.

Каждое из колёс крана, катясь по рельсу, генерирует опасные локальные напряжения силами P^{loc} и T^{loc} , передающиеся на находящуюся под рельсом подкрановую балку. Чем больше эксцентриситет каждой из сил, тем больше крутящий момент $M_{кр}^{loc}$, закручивающий верхний пояс.

От профиля сечения рельса и его моментов инерции J_{xp} , J_{yp} , $J_{крp}$ в сильной степени зависит, какие амплитуды колебаний напряжений, и особенно сдвигающих, возникнут в подрельсовой зоне балки. Увеличение длины контактной зоны рельса с верхним поясом балки резко снижает, сглаживает амплитуды сдвигающих напряжений, в результате уменьшается вероятность возникновения усталостных трещин. Изменяя профиль сечения, мы управляем опасными колебаниями сдвигов и, следовательно, конструкцией рельса, легко минимизируем опасные амплитуды сдвигов напряжений. Разработанные амортизирующие рельсы арочного профиля обладают в 4...12 раз большими моментами инерции при изгибе по сравнению со стандартными крановыми рельсами и распределяют контактные напряжения взаимодействия рельса с верхним поясом балки на большую длину, в результате значительно повышается выносливость подрельсовой зоны [2, 3].

Полное арочное сечение рельса обладает естественной амортизирующей способностью, минимизирующей динамику воздействий колёс кранов. Это соединение сдвигоустойчиво (материал рельса включён в работу верхнего пояса балки на изгиб, что обеспечивает слитную работу его с верхней частью балки и способствует дополнительному увеличению моментов инерции J_x , J_y , $J_{кр}$ верхней части балки в 2–3 раза), потребность в клеммах отпадает.

Предлагаемый рельс выполняется трёхглавым, полым, арочным в сечении, с центральной главой, воспринимающей вертикальные P^{loc} воздействия, и двумя боковыми на краях пят арки, ориентированными вправо и влево и предназначенными для восприятия горизонтальных T^{loc} воздействий колёс крана, причём боковые главы охватывают верхний пояс балки. При установке трёхглавого рельса верхний пояс западает между боковыми главами, и рельс чётко фиксируется на балке в поперечном направлении, причём функцию затяжки арки выполняет верхний пояс балки.

Для проведения испытаний арочного амортизирующего рельса, с целью определения фактического распределения напряжений в нем, была изготовлена крупномасштабная модель рельса Р1.

Материал рельса – сталь С255 по ГОСТ 27772-88 (ВСтЗсп5). Арка рельса гнулась на листогибочном станке из листа толщиной 4 мм, глава рельса – квадрат 24×24 мм. Геометрические параметры рельса показаны на рис. 1.

Крепление элементов модели амортизирующего рельса осуществлялось с помощью болтов М8 с гарантированным натягом; величина шага болтов 50 мм.

Образование отверстий в элементах модели рельса проводилось следующим образом: элемент арки, гнутый лист толщиной 4 мм, размечался и накернивался, затем к нему с помощью струбцин крепился элемент затяжки, лист размером 200×600 и толщиной 2 мм, сверлились отверстия под болты (Ø8 мм). Глава рельса крепилась к арке с помощью высокопрочных легированных болтов М12 по концам модели. Перед постановкой элементов поверхности обрабатывались шлифовальной машинкой. Общий вид модели амортизирующего рельса показан на рис. 2.

Материал шпилек, гаек и шайб – сталь 35 (термоупрочненная), $R_{бun} = 800$ МПа (ГОСТ 1050-88). Из этого условия вычисляем усилие натяжения:

$$P = 0,7 \cdot R_{бun} \cdot A_{bn} = 0,7 \cdot 800 \cdot 0,38 = 208 \text{ гН.}$$

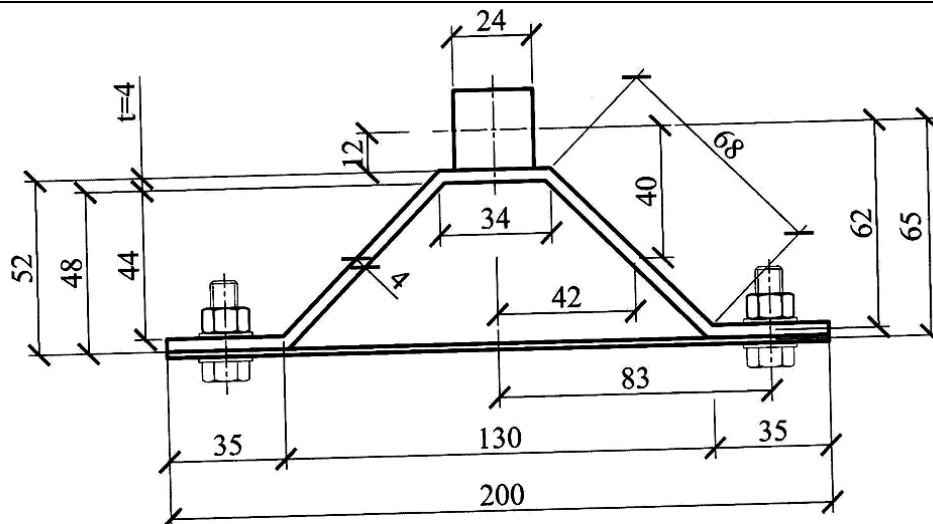


Рис. 1. Геометрические размеры модели амортизирующего рельса

Контроль натяжения шпилек осуществлялся тарировочным ключом КМТ-250 по моменту закручивания. Требуемый момент закручивания

$$M_3 = d \cdot K \cdot P = 0,8 \cdot 0,15 \cdot 208 = 24,9 \text{ гН}\cdot\text{см},$$

где d – номинальный диаметр болта; K – коэффициент закручивания; P – величина осевого усилия натяжения болта.

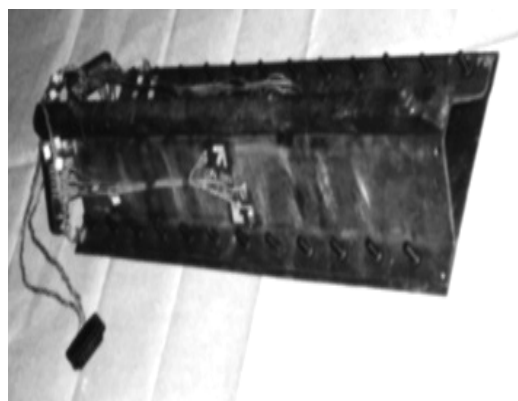


Рис. 2. Общий вид экспериментальной модели амортизирующего рельса

Для записи изменения деформаций при проведении испытаний использовался автоматический измеритель деформаций ЦТК-1 в комплекте со стопозиционным переключателем АП-3. В каждой из розеток находилось по три тензорезистора: вертикальный – для измерения ε_y , горизонтальный – для измерения ε_x и наклонный под углом 45° к оси балки – для измерения ε_{45° (рис. 3). Тензорезисторы с базой 5 мм, сопротивлением 99,9 Ом, тензочувствительностью 1,98 наклеивались на рельс по аналогичной схеме, что и на модели подкрановых балок, клеем БФ-2 с термообработкой 180°C . Розетки по обе стороны стенки, то есть 24 тензорезистора, объединялись двумя разъёмами, которые посредством соединительных кабелей сообщались со стопозиционным переключателем. Такое подключение позволило произвести запись деформаций с розеток, расположенных на противоположных сторонах стенки, что дало возможность полностью описать напряжённое состояние в данном сечении.

Согласование чувствительности тензорезисторов и прибора и вычисление поправочных коэффициентов осуществлялось аналогично с согласованием чувствительности тензорезисторов балок.

Испытания модели амортизирующего рельса проводились на базе кафедры «Строительные конструкции» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. На рельс передавалась сосредоточенная сила, и по изменениям показаний тензорезисторов отслеживалось изменение напряжённого состояния рельса, в зависимости от места приложения (рис. 4) и величины силы, развиваемой прессом.

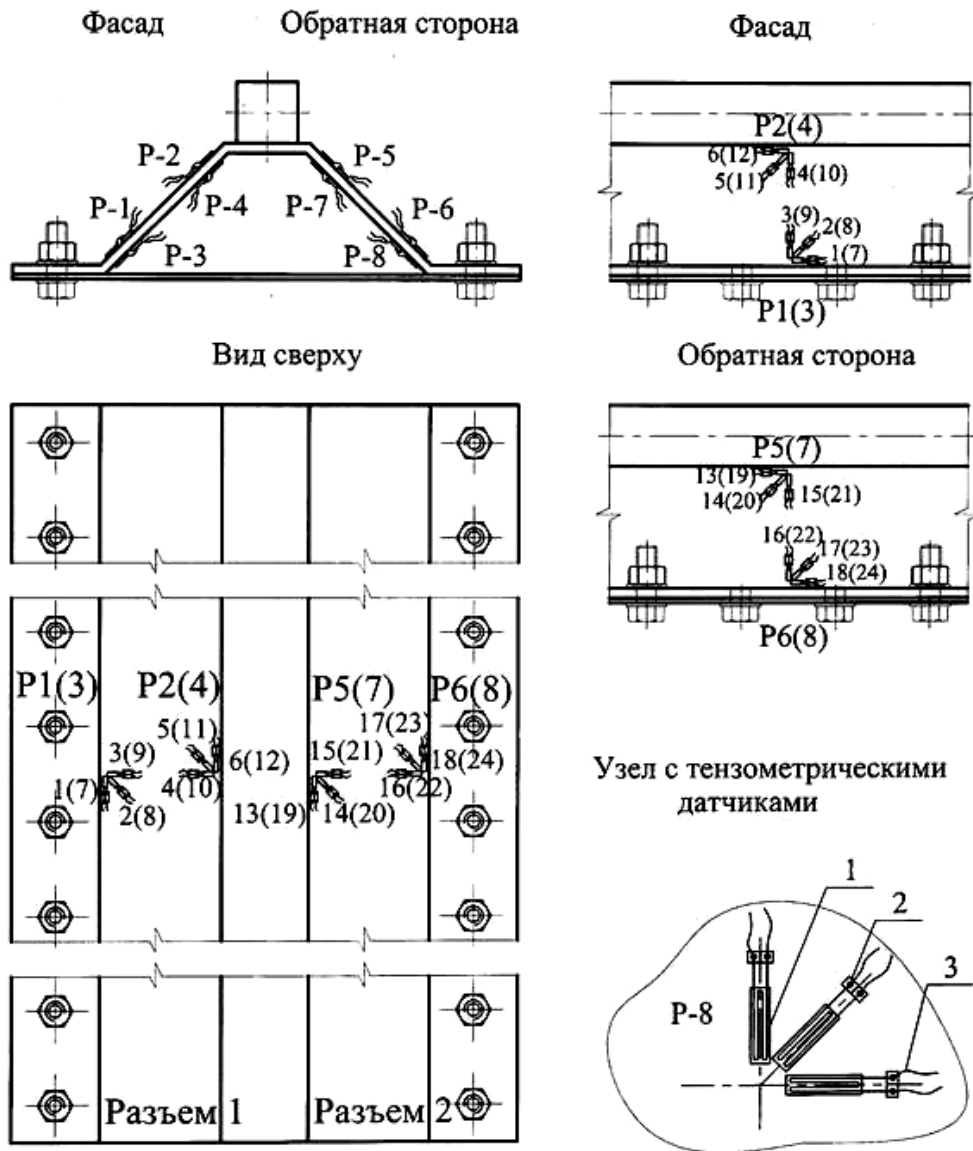


Рис. 3. Расположение тензорезисторов на исследуемых зонах амортизирующего рельса P1:
1 – тензодатчик; 2 – тектолит; 3 – соединительные провода

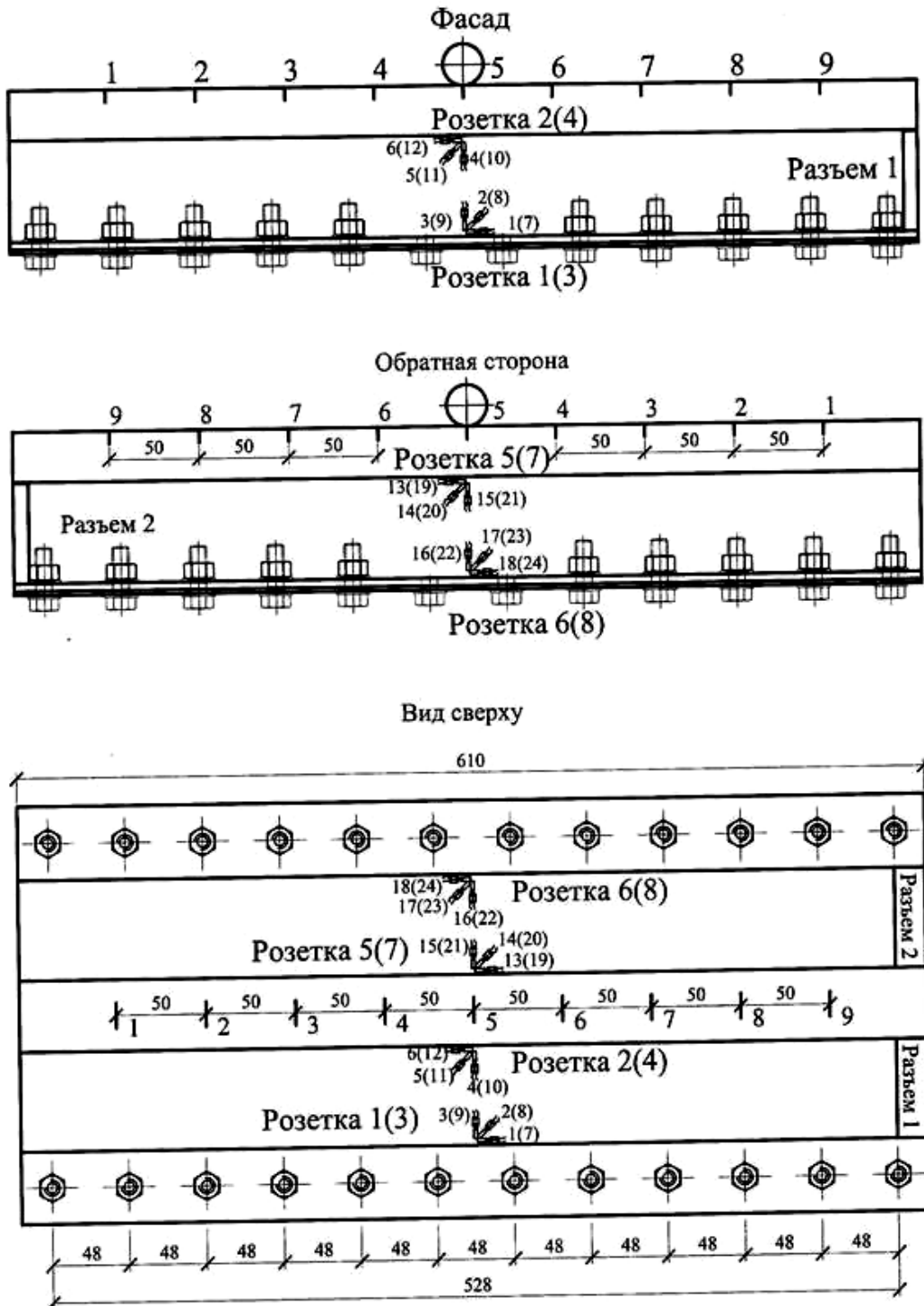


Рис. 4. Положение амортизирующего рельса P1 в стене, розеток тензорезисторов на исследуемых зонах рельса P1 (в скобках указаны номера тензодатчиков и розеток, находящихся с внутренней стороны арки рельса)

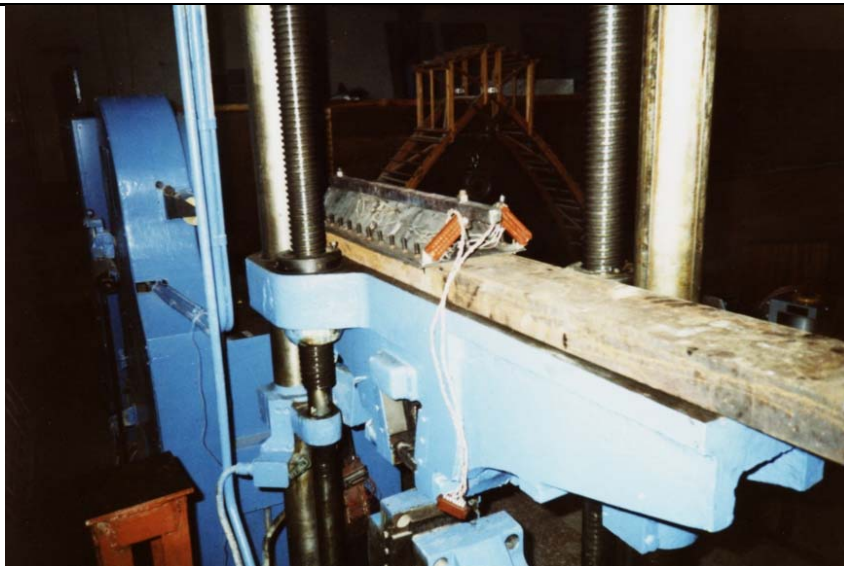


Рис. 5. Положение модели амортизирующего рельса P1 в стенде

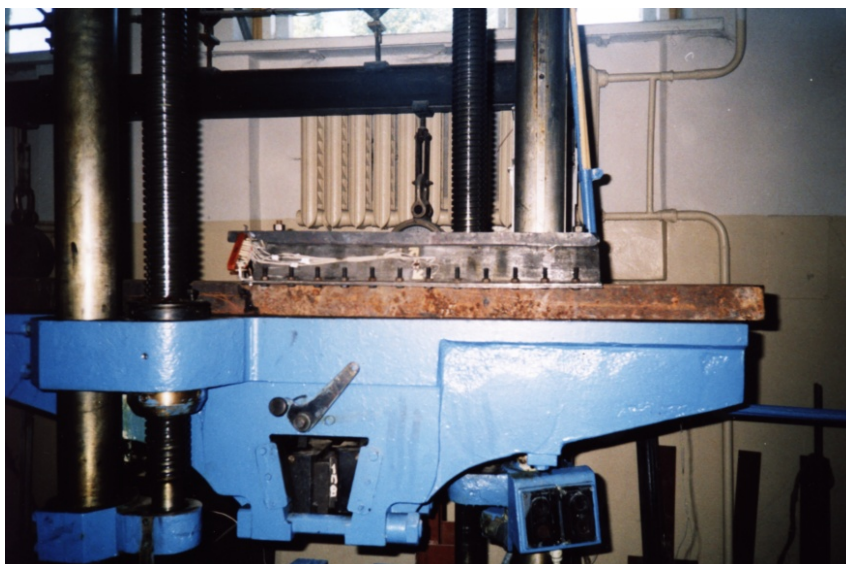


Рис. 6. Проведение испытаний амортизирующего рельса P1 в стенде

Испытания проходили в следующей последовательности:

- задавалась величина ступени нагружения, равная 100 гН;
- задавалось место приложения сосредоточенной силы (точки с 1 по 9, см. рис. 4);
- записывались показания тензорезисторов;
- при прохождении данной ступени нагрузки процесс повторялся со следующей ступенью.

Продольное перемещение модели рельса, а соответственно, и смена сечения производились вручную после прохождения всех ступеней нагружения с 1 по 4 в одном сечении. За расчётное сечение принято сечение непосредственно над датчиками, то есть сечение №5 (см. рис. 4). Затем для получения полной картины изменения напряжённо-деформированного состояния, в зависимости от удаления расчётного сечения от места приложения силы, все ступени нагружения повторялись в остальных точках. Во всех сечениях с 1 по 9 и на каждой ступени нагружения выполнялась запись показаний тензодатчиков.

Арочные рельсы по сравнению с традиционными рельсами отличаются повышенной выносливостью. В ветвях рельса возникает только сжатие, рельс обладает амортизирующими свойствами, что влечёт за собой значительное ослабление динамики воздействий колёс и улучшает условия работы как материала рельса и балки, так

и элементов крана, при этом повышаются характеристики рельса на изгиб и на кручение с одновременным снижением материаломкости. Упрощается крепление рельса. Обеспечивается слитная работа рельса с верхним поясом, и сход рельса исключён. Расход металла на рельс уменьшается, изгиб шейки при действии горизонтальной составляющей силы T исключён, и она работает только на сжатие, нет необходимости делать её такой же массивной, как в традиционном рельсе, по ГОСТ 4121-76. В амортизирующем рельсе все переходы от одного элемента к другому плавные по радиусу, что обеспечивает минимальную концентрацию напряжений [4].

При проведении испытаний основной упор сделан на изучение характера распределения напряжений в арочном рельсе. Наиболее яркая картина прорисовывается при величине вертикальной силы 400 гН.

По данным испытаний фрагмента рельса построены линии влияния напряжений в исследуемых зонах (рис. 7–14).

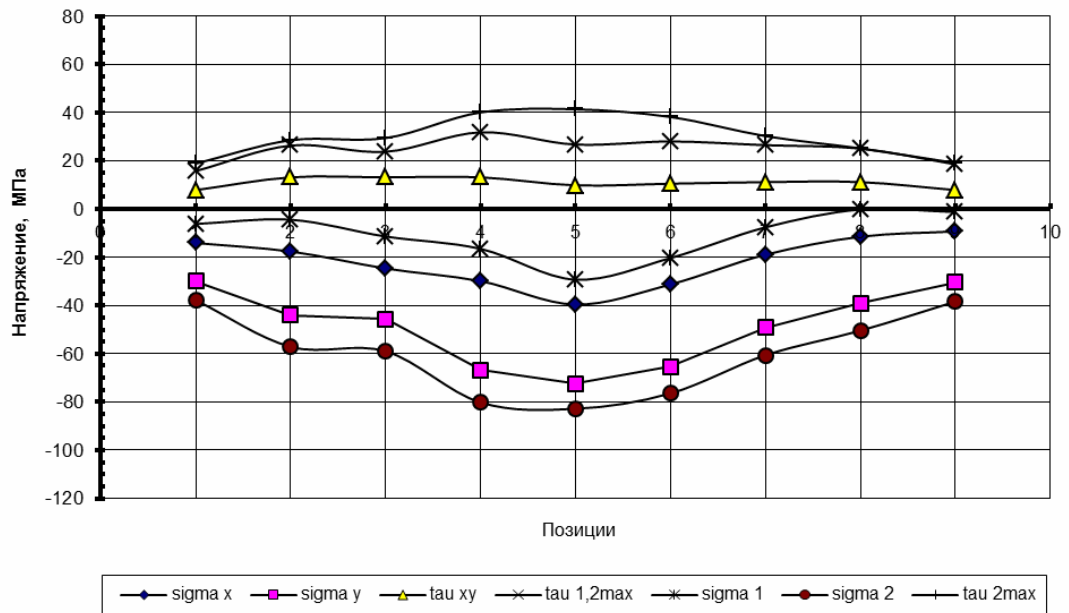


Рис. 7. Линии влияния напряжений в розетке P-1 (наружные нижние датчики на 1 стороне, нагрузка – 4т)

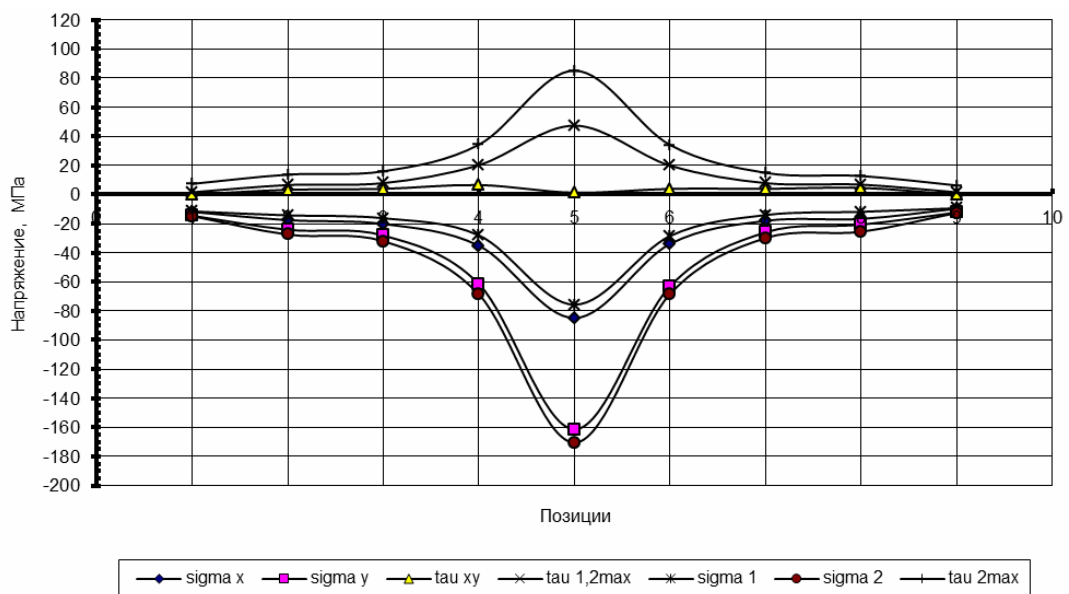


Рис. 8. Линии влияния напряжений в розетке P-2 (наружные верхние датчики на 1 стороне, нагрузка – 4т)

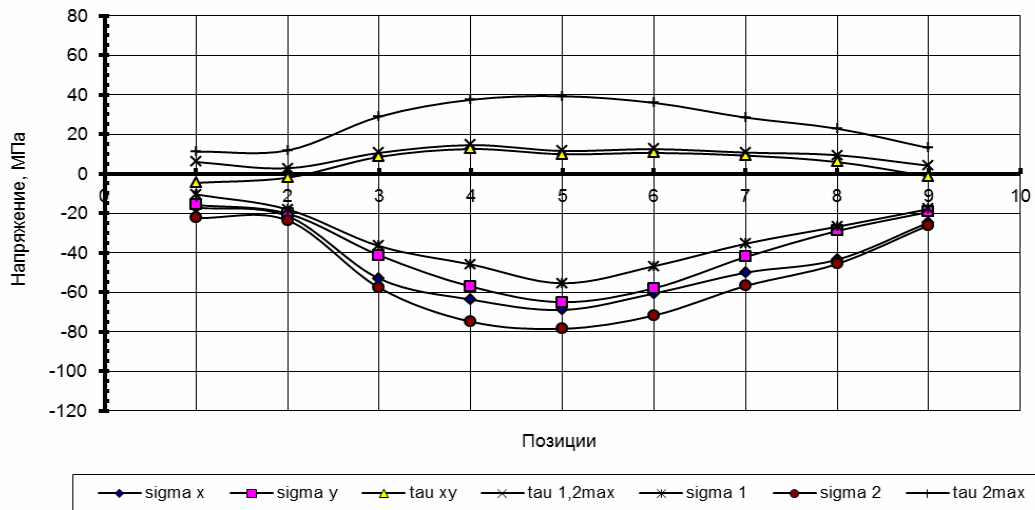


Рис. 9. Линии влияния напряжений в розетке Р-3 (внутренние нижние датчики на 1 стороне, нагрузка – 4т)

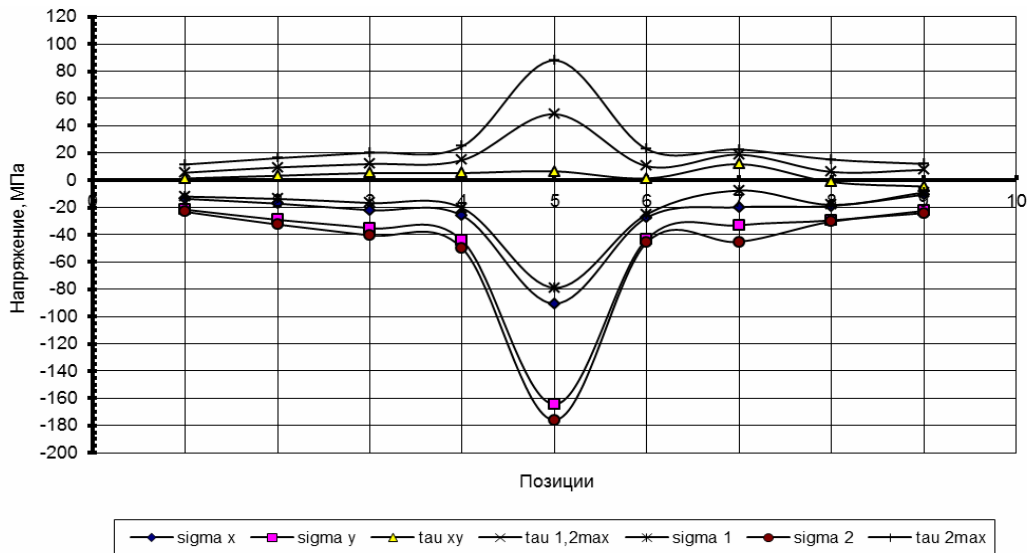


Рис. 10. Линии влияния напряжений в розетке Р-4 (внутренние верхние датчики на 1 стороне, нагрузка – 4т)

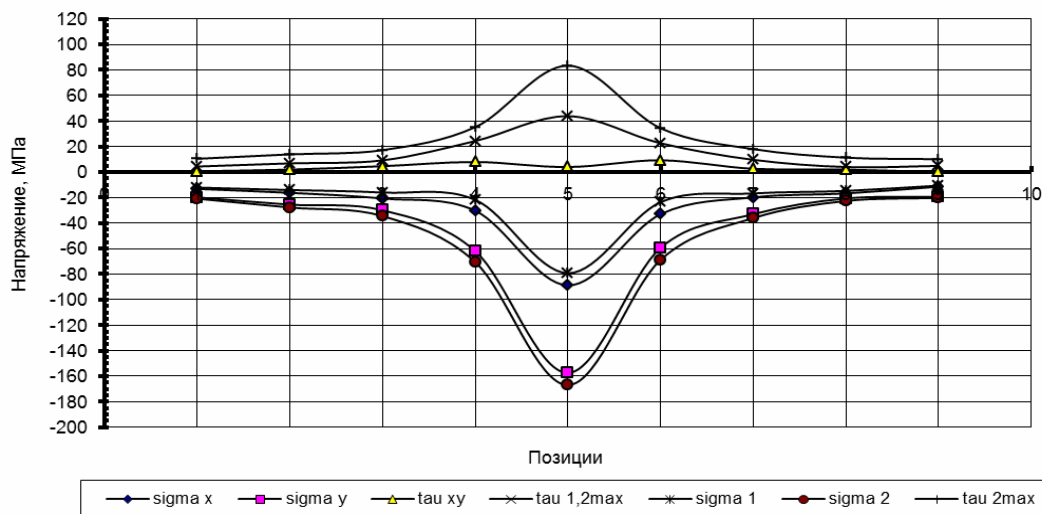


Рис. 11. Линии влияния напряжений в розетке Р-5 (наружные верхние датчики на 2 стороне, нагрузка – 4т)

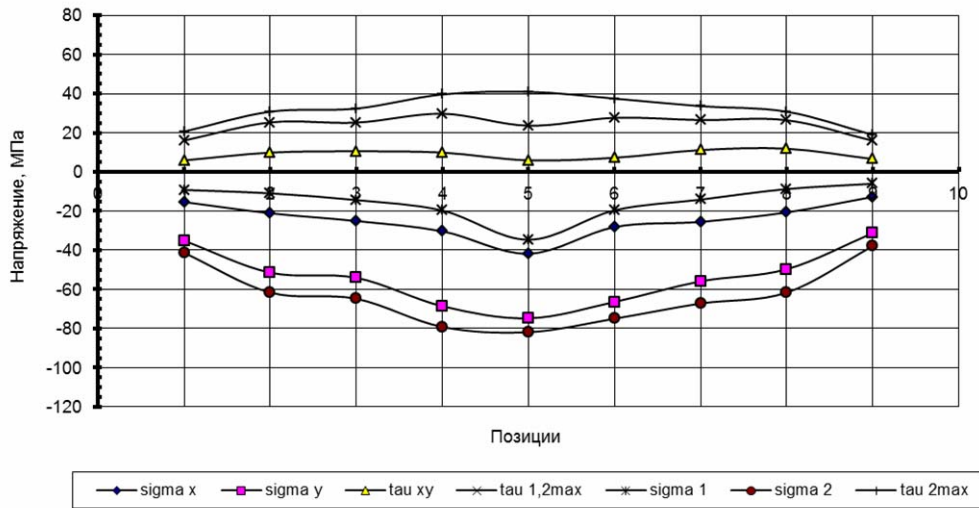


Рис. 12. Линии влияния напряжений в розетка Р-6 (наружные нижние датчики на 2 стороне, нагрузка – 4т)

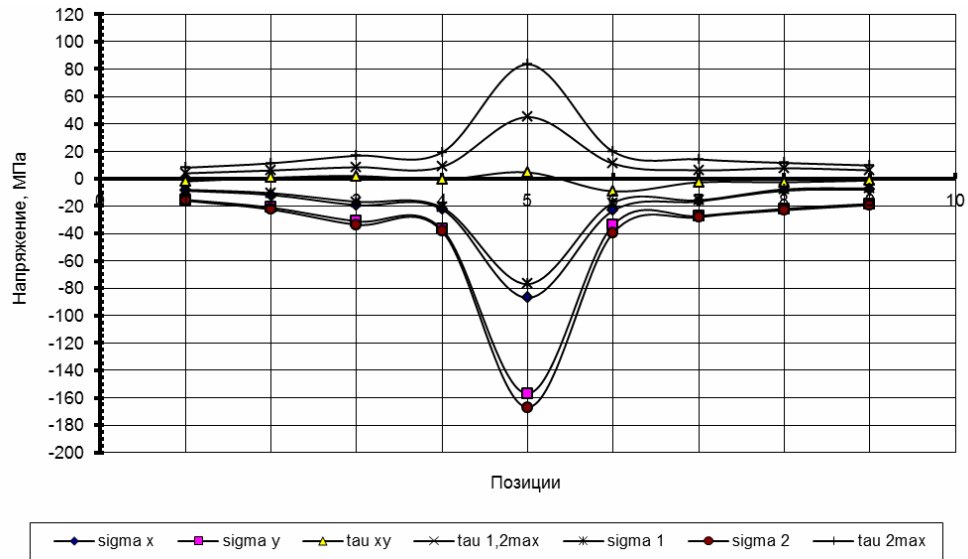


Рис. 13. Линии влияния напряжений в розетка Р-7 (внутренние верхние датчики на 2 стороне, нагрузка – 4т)

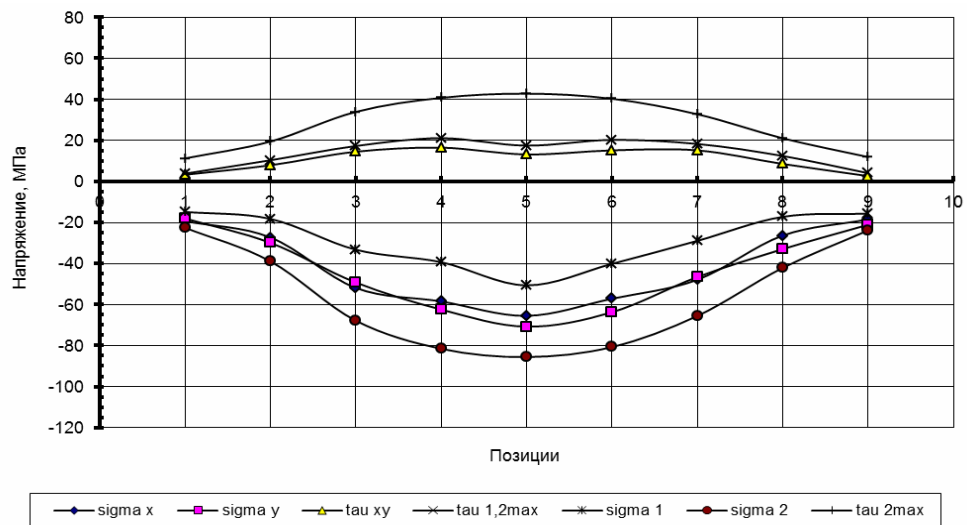


Рис. 14. Линии влияния напряжений в розетке Р-8 (внутренние нижние датчики на 2 стороне, нагрузка – 4т)

Проанализировав результаты эксперимента, можно констатировать, что в ветвях амортизирующего арочного рельса возникает сжатие. Разница в напряженном состоянии ветвей, судя по симметричным относительно оси рельса розеткам Р-1 и Р-6, Р-3 и Р-8, Р-2 и Р-5, Р-4 и Р-7, практически не ощущалась, что, собственно, и предполагалось. Поэтому можно говорить о двух испытанных в идентичных условиях рельсах.

Циклические воздействия от колёс крана в реальных конструкциях сначала воспринимает глава амортизирующего рельса, поэтому воздействия имеют наиболее концентрированный локальный характер, что отражается на всех компонентах напряжённого состояния (см. рис. 8, 10, 11, 13). Наибольшей величины достигают, как и ожидалось, главные сжимающие напряжения [5, 6].

Усилие передаётся на арку, где по ветвям уходит в основание арки и в затяжку. В нижней части ветвей арки напряжения распределяются на большую длину и, соответственно, на балку передаются, не локально сосредоточившись, а равномерно распределившись. На рис. 7, 9, 12 и 14 приводится анализ графиков напряжений в нижних розетках рельса.

Проведенное испытание подтвердило предположения о том, что арочное сечение рельса позволяет разделить, сгладить амортизацией динамические воздействия колёс кранов и тем самым значительно повысить выносливость.

Арочная форма сечения *амортизирует удары колёс*, что благоприятно отражается на работе и рельсобалочной конструкции, и крана. Она также обеспечивает выгодное соотношение между высотой и шириной сечения. Благодаря тому что ширина больше высоты, устойчивость рельса хорошая.

Выводы

1. Арочный рельс обладает амортизирующими свойствами, повышенной устойчивостью, более высокими характеристиками на изгиб и кручение, при пониженной материалоемкости. Амортизирующая способность появилась благодаря его арочному профилю.

2. Испытания показали, что амортизирующий арочный рельс позволяет передать воздействия от колёс по двум ветвям арки и этим разгрузить подрельсовую зону и качественно улучшить её напряжённо-деформированное состояние.

3. Анализ локального напряжённо-деформированного состояния в стенках рельса под его главой показывает, что оно аналогично напряжённо-деформированному состоянию в стенке подкрановой балки.

Список литературы

1. Нежданов, К.К. Сборные подкрановые балки из прокатных профилей / К.К. Нежданов, А.С. Лаштанкин, И.Н. Гарькин // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2013. – №3. – С. 69–75.
2. Нежданов, К.К. Экстремальное повышение моментов инерции рельсов при кручении / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2011. – № 6 (239). – С. 30–31.
3. Нежданов, К.К. Применение толстостенных двутавровых крановых рельсов / К.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3. – С. 79–84.
4. Сабуров, В.Ф. Влияние стыка кранового рельса на работу подкрановых путей промышленных зданий / В.Ф. Сабуров // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 2 (686). – С. 5–14.
5. Туманов, В.А. Повышение выносливости стальных подкрановых балок / В.А. Туманов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 75–82.
6. Сабуров, В.Ф. Использование моделей упругого основания для анализа распределения локальных напряжений в стенке стальных составных балок / В.Ф. Сабуров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 4, т. 14. – С. 15–20.

References

1. Nezhdanov, K.K. Prefabricated crane beams from rolling profiles / K.K. Nezhdanov, A.S. Lashtankin, I.N. Garkin // *Structural Mechanics and Structural Analysis*. – 2013. – No. 3. – P.69–75.
2. Nezhdanov, K.K. Extreme increase in the moments of inertia of rails during torsion / K.K. Nezhdanov, A.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // *Structural Mechanics and Structural Analysis*. – 2011. – № 6 (239). – P. 30–31.
3. Nezhdanov, K.K. The use of thick-walled I-beam crane rails / K.K. Nezhdanov, A.A. Kuzmishkin, I.N. Garkin // *Regional architecture and engineering*. – 2012. – No. 3. – P. 79–84.
4. Saburov, V.F. Influence of the junction of a crane rail on the operation of crane tracks of industrial buildings / V.F. Saburov // *News of Higher Education Institutions. Construction*. – 2016. – № 2 (686). – P. 5–14.
5. Tumanov, V.A. Increasing the endurance of steel crane beams / V.A. Tumanov // *Regional architecture and engineering*. – 2012. – № 1. – P. 75–82.
6. Saburov, V.F. The use of elastic base models to analyze the distribution of local stresses in the wall of steel composite beams / V.F. Saburov // *Bulletin of South Ural State University. Series: Construction and Architecture*. – 2014. – № 4, vol. 14. – P. 15–20.

УДК 692.2.057:[502+551.58]

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

Дерина Мария Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Петрянина Любовь Николаевна,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@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

Derina Maria Alecsandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Urban Construction and
Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Petryanina Lyubov Nikolaevna,
Associate Professor of the department «Urban
Construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина

Определены причины появления дефектов наружных стен, связанные с недостаточностью учёта при проектировании предельного влияния сочетаний природно-климатических составляющих на панельные стены и наиболее ответственные участки в их конструкции. Приведены результаты исследований конструктивных проектных и натуральных решений наружных стеновых панелей на воздействие природно-климатических факторов и дана оценка способности герметика сохранять требуемые эксплуатационные свойства при предельных климатических воздействиях. Предложены методика определения сопротивления теплопередаче ограждающей стеновой конструкции с учётом эксплуатационных затрат на наружные панельные стены, практические рекомендации по проектированию стеновых панелей и конструктивное решение межпанельных стыков в неблагоприятных природно-климатических условиях.

Ключевые слова: стеновые панели, конструктивное решение, стыки, герметик, теплоизоляция, воздухопроницаемость, природно-климатические факторы, эксплуатация

APPLICATION OF INDUSTRIAL WALL STRUCTURES IN VARIOUS NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS

M.A. Derina, L.N. Petryanina

The reasons for the appearance of defects in external walls due to the lack of consideration of the limiting influence of combinations of natural and climatic components on panel walls and the most important areas in their design are determined. Tests of structural design and full-scale solutions of external wall panels on the impact of natural and climatic factors and assessment of the ability of the sealant to maintain the required performance properties under extreme climatic conditions were carried out. The method of determining the heat transfer resistance of the enclosing wall structure with consideration of the operating costs of external panel walls and practical recommendations for the design of wall panels and the design solution of inter-panel joints in adverse natural and climatic conditions are suggested.

Keywords: wall panels, structural design, joints, sealant, thermal insulation, breathability, natural and climatic factors, operation

Индустриальные стены современных жилых зданий – это сложные конструкции, удовлетворяющие комплексу действующих технических, эстетических и экономических требований.

Практически нормативные требования реализуются методом выбора варианта из нескольких конструктивных решений стен при проектировании, отвечающих теплоизоляционным качествам и отличающихся размерами, системой разрезки, наружной отделкой и другими свойствами. Такие решения могут при одной и той же конструктивной схеме здания обеспечить взаимозаменяемость различных вариантов стен по количеству слоёв и виду используемых конструкционных и отделочных материалов.

Анализ проектных решений показал, что варианты панельных стен разрабатываются для разных природно-климатических условий с учетом строительной материально-технической базы.

Выбранный как оптимальный вариант панельных стен в исследуемых проектах обеспечивает выполнение требований, во-первых, прочности, устойчивости, деформативности, огнестойкости и естественной освещённости помещений, во-вторых, тепло-, воздухо-, влаге – и звукоизоляции.

В рассмотренных проектах из расчетных вариантов панельных стен принимался тот, который оптимально отвечал требованиям и возможностям капитальных затрат, транспортировки и эксплуатации за определённый период. В случае если при таком расчете не выявляются преимущества предлагаемых вариантов, то выбирается тот, который имеет наименьшую трудоёмкость при строительстве, лучшие эксплуатационные характеристики и комфортные условия жилья в заданных природно-климатических условиях [1].

Как известно, расчет наружных стен выполняется согласно нормам на каждый вид климатических факторов. Однако большинство физико- и природно-климатических воздействий на наружные стены зданий – комплексные, одновременно зависящие от нескольких факторов.

Недостаточный учёт природно-климатических факторов при проектировании является причиной появления дефектов панельных стен от неблагоприятных воздействий сочетаний температуры наружного воздуха, скорости ветра и солнечной радиации; скорости ветра и интенсивности выпадающих осадков.

Натурные обследования и изученный проектный материал показали, что особенно подвержены совместному воздействию ветра и осадков стыки стеновых панелей, примыкания оконных блоков и стеновых панелей, а также сами стеновые панели из лёгких и ячеистых бетонов без качественной наружной отделки. Излишнее увлажнение, протечки в стыках, возникающие при этом, значительно снижают эксплуатационные качества стен и ухудшают условия проживания. Наиболее заметно это проявляется в регионах со значительным количеством косых дождей, большой скоростью и повторяемостью ветра, а также с высокой температурой наружного воздуха.

В настоящее время при проектировании не выполняются расчёты, учитывающие неблагоприятные воздействия температуры наружного воздуха и ветра при таких сочетаниях, как умеренная температура и высокая скорость ветра, низкая температура и безветрие, очень низкая температура и сильный ветер.

На основании вышеизложенного был сделан вывод о том, что для создания комфортных микроклиматических условий жилища важно точно определить сопротивление теплопередаче в исследуемых конструкциях стен. Для этого была разработана методика по определению сопротивления теплопередаче ограждающей стеновой конструкции, в основу которой был положен учёт эксплуатационных затрат на наружные панельные стены. Дальнейшие расчёты показали, что стены, запроектированные по такой методике, имеют лучшие санитарно-гигиенические характеристики и требуют значительно меньших приведённых затрат [2].

Резерв повышения качества жилища заложен и в точном учёте явлений, связанных с теплопередачей, при проектировании наружных панельных стен.

Приёмы проектирования наружных стен, применяемые в настоящее время, недостаточно учитывают их воздухопроницаемость, что не позволяет выполнить оценку смещения температурного поля в толще стены и правильно рассчитать системы отопления и вентиляции в здании. Отдельные исследования российских учёных показали, что можно уменьшить расход тепла на проветривание помещений, заменив обычный способ проветривания на проветривание с применением воздухопроницаемых вставок, или использовать специально сформированную структуру бетона для стеновых панелей.

В результате проведённых исследований и изученного опыта строительства и эксплуатации были разработаны частные рекомендации по проектированию наружных стеновых панелей для зданий, предполагаемых к строительству в неблагоприятных природно-климатических условиях [3].

Наружные панельные стены зданий, строящихся в первом климатическом районе с суровыми климатическими условиями, должны иметь максимальную теплоизоляцию, воздухопроницаемость, а также малый вес и транспортабельность. Обязательны к использованию гибкие связи, утеплитель (пенопласты, применение стекло- и минераловатных утеплителей ограничено). Наружные обшивки стеновых панелей – алюминиевые сплавы и т.п. Такие мероприятия позволят значительно снизить теплопотери через ограждения.

В третьем и четвертом климатических районах стеновые ограждающие конструкции следует защищать от сильного перегрева в летний период и от низких температур зимой, а также резких сезонных и суточных температурных колебаний. Так, предпочтительны к применению такие конструктивные решения стен, которые способствуют снижению солнечного перегрева (вентпрослойки и наружные экраны); обеспечивают свободные температурные деформации панели в целом и наружного слоя (слоистые конструкции, податливые соединения стыков между панелями и креплений панелей к несущим конструкциям здания).

Конструкции наружных стеновых панелей, предполагаемые к применению в климатических районах с высокой влажностью и районах с совместным негативным воздействием сильного ветра и осадков, должны предотвращать попадание на поверхность стены влаги (лоджии, балконы, козырьки) и защищать от проникновения влаги внутрь стены (гидрофобные покрытия, облицовка из влагонепроницаемых материалов), а также способствовать удалению попавшей внутрь стены влаги (дренаж, экраны на отnose) [4].

Наиболее уязвимым местом в конструкции панельных стен являются стыки – между панелями, перекрытиями, оконными блоками, плитами балконов и лоджий, на ремонт которых выделяются значительные средства. Поэтому при проведении их обследования особо изучались водо- и воздухозащитные качества, обеспеченные следующими устройствами:

- зона герметизации, где располагаются материалы, выполняющие роль герметиков и уплотнителей;
- конструктивный элемент (экран) – водоотбойная лента, укладываемая в зазоры и защищающая от ветра, влаги, солнечной радиации и совместного воздействия этих факторов;
- незаполненная часть стыка: а) свободный участок, в котором резко происходит снижение скорости движения воды, – декомпрессионный канал; б) свободный участок, через который отводится попавшая в стык влага, – дренажный канал;
- устройство для отвода воды (трубка, фартук) – конструктивный элемент для отвода наружу влаги, попавшей внутрь стыка;
- часть стыка, выступающая вверх, не позволяющая влаге проникать внутрь стены, – противодождевой барьер;
- часть вертикального стыка (накладка), выполняемая из материалов, обеспечивающих требуемую устойчивость к воздействию.

Было определено, что требуемое сопротивление воздухопроницанию в межпанельных стыках с декомпрессионными каналами обеспечивается уплотнителем, распо-

ложенным за водозащитой. Водонепроницаемость обеспечена конструктивными устройствами (дренажными каналами). Рассчитано, что такие стыки с декомпрессионными и дренажными каналами наиболее применимы в климатических условиях с количеством выпадающих на вертикальную поверхность осадков более 12 мм/час.

В большей части обследуемых объектов в стыках между наружными стеновыми панелями участки герметизации устроены без дренажных каналов. Поэтому во вновь проектируемых зданиях предлагается устраивать дренируемые стыки с герметизацией в наружном участке. В вертикальных стыках в наружном участке закладывать профильную ленту, а в вертикальных – металлический фартук [5].

Предлагаемые межпанельные стыки с герметизацией и дренажем для водоотвода более эффективны по теплотехническим расчётам для применения при низких температурах наружного воздуха, чем стыки с декомпрессионным каналом и экраном.

Рассмотренные плоские горизонтальные стыки без противодождового устройства могут применяться только в климатических районах с небольшим количеством осадков при условии тщательной заделки герметиком [6].

Вместе с конструктивными решениями межпанельных стыков было изучено качество герметизирующих материалов, т.к. при атмосферном воздействии в период эксплуатации герметики подвергаются деформациям: растяжению, сжатию, сдвигу. Исследованиями определено, что воздействия на герметик в период эксплуатации зависят от его расположения в стыке и от климатических условий района строительства. Была составлена классификация воздействия климатических факторов на материал герметика в стыках в зависимости от его конструктивного расположения, где выделены участки эксплуатационных воздействий: максимальных, средних и минимальных (табл.1).

Т а б л и ц а 1

Воздействие климатических факторов на материал герметика
в стыках наружных стеновых панелей

Природно-климатические факторы	Участок стыка по воздействиям		
	минимальным	средним	максимальным
Изменение температуры наружного воздуха, °С	18±10	(-8)-(+35)	(-40)-(+50)
Изменение относительной влажности, %	55±5	70-85	100
Воздействие солнечной радиации на вертикальную поверхность, ккал/час	0	250	500
Воздействие расчетной скорости ветра для определения тепловых потерь, м/сек	0	8	20
Воздействие максимальной скорости ветра при выпадении осадков, м/сек	0	20	28
Воздействие максимального количества и продолжительности непрерывных атмосферных осадков на вертикальную поверхность	Разовое увлажнение	60 мм (до 3 суток)	200 мм (до 7 суток)

Для оценки способности герметика сохранять требуемые эксплуатационные свойства при предельных климатических воздействиях были проведены исследования некоторых видов герметиков в натуральных и лабораторных условиях.

Для исследований были определены факторы воздействия, приведённые в табл. 2.

Сравнение устойчивости мастичных герметиков в период эксплуатации

Факторы воздействия	Тип герметика					
	ГТ-1	Поли-Г	УГТ-50	МГТ-50	ТГТ-А	Мастик-плюс
Температура наружного воздуха, °С:						
–40	ну	су	у	у	у	у
–20	уу	уу	у	у	у	у
+20	у	у	у	у	у	у
+40	уу	уу	уу	су	у	у
+50	уу	н	су	ну	уу	уу
Замораживание-оттаивание (до 100 циклов)	у	уу	у	у	у	у
Увлажнение бетонной поверхности без грунтового покрытия:						
– 1сутки	уу	уу	уу	уу	у	у
– 3суток	уу	су	ну	ну	у	у
– 5суток	ну	ну	ну	ну	ну	су
– 7суток	ну	ну	ну	ну	ну	ну
Увлажнение бетонной поверхности с грунтовым покрытием:						
– 7 суток	уу	уу	у	уу	у	у
Напряженное состояние (период искусственного старения), час:						
– 1000	у	су	у	ну	у	у
– 1500	уу	ну	уу	ну	у	у
– 2000	су	ну	су	ну	уу	уу
Зона с жарким климатом, период эксплуатации 48 месяцев:						
– с защитой поверхности	уу	ну	су		уу	уу
– без защиты поверхности	ну	ну	ну		су	су
Зона с жарко-влажным климатом, период эксплуатации 48 месяцев:						
– с защитой поверхности	уу	ну	уу		уу	уу
– без защиты поверхности	уу	ну	су		уу	уу

У слов н ы е о б о з н а ч е н и я : у – устойчив; уу – удовлетворительно устойчив; су – слабоустойчив; ну – неустойчив.

В результате проведённых исследований было установлено, что под воздействием природно-климатических факторов изменились свойства исследуемых материалов – деформативность, прочность, герметичность.

Во всех исследуемых герметиках наиболее интенсивное старение происходит под воздействием высоких температур в летний период, а затем этот процесс замедляется и становится малозаметным.

Максимальные изменения характерны для таких типов герметиков, как «Поли-Г», УГТ-50, а герметики ТГТ-А, «Мастик-плюс», образующие плёнку, более устойчивы к климатическим воздействиям. Защита поверхности стыков влияет на их воздухопро-

нищаемость, и с течением времени фильтрация затухает, что означает отсутствие на участке герметика дефектов [7].

Выводы

1. Предложены:
 - методика по определению сопротивления теплопередаче ограждающей стеновой конструкции, основой которой является учёт эксплуатационных затрат на наружные панельные стены, что даст экономию 20%;
 - практические рекомендации по проектированию наружных стеновых панелей для зданий, предполагаемых к строительству в неблагоприятных природно-климатических условиях;
 - варианты защиты поверхности герметиков в межпанельных стыках плёночным покрытием, предохраняющим внутренний участок стыка и улучшающим свойства герметизации.
2. Разработаны межпанельные стыки с герметизацией и дренажем для водоотвода, более эффективные по теплотехническим расчётам для применения при низких температурах наружного воздуха, чем стыки с декомпрессионным каналом и экраном.

Список литературы

1. Beregovoy, V.A. Lightweight ceramic materials with increased strength based on microporous silicates / V.A. Beregovoy, A.M. Beregovoy // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol.284. SSP. – P.90–94.
2. Береговой, А.М. Ограждающие конструкции с регулируемыми параметрами тепломассопереноса / А.М.Береговой, В.А.Береговой, А.В.Гречишкин, А.В. Воскресенский // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – №1(36). – С.97–101.
3. Береговой, А.М. Теплотехнические свойства наружных ограждений в условиях жаркого и холодного климата / А.М. Береговой, В.А. Береговой, Ю.П. Скачков // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – №4(37). – С.123–127.
4. Береговой, А.М. Тепловые потери через наружные ограждающие конструкции в процессе эксфильтрации воздуха / А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина // *Приволжский научный журнал*. – 2017. – №2(42). – С.44.
5. Береговой, А.М. Моделирование теплоустойчивости наружных ограждений для оценки тепловых потерь зданий и микроклимата помещений / А.М.Береговой, М.А. Дерина // *Моделирование и механика конструкций*. – 2016. – №3. – С.16.
6. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции в системе воздухообмена жилого многоэтажного здания / А.М. Береговой, М.А. Дерина // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – №1–1. – С.24.
7. Дерина, М.А. Моделирование различных вариантов утепления наружных стен зданий / М.А.Дерина, А.В.Скотникова // *Моделирование и механика конструкций*. – 2018. – №7. – С.16.
8. Петрянина, Л.Н. Особенности применения конструкций наружных стен в различных климатических условиях/ Л.Н. Петрянина // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. – 2018. – №2(15). – С.225.

References

1. Beregovoy, V.A. Lightweight ceramic materials with increased strength based on microporous silicates / V.A. Beregovoy, A.M. Beregovoy // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol.284. SSP. – P.90–94.
2. Beregovoy, A.M. Walling with adjustable parameters of heat and mass transfer / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, A.V. Grechishkin, A.V. Voskresensky // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – No. 1(36). – P. 97–101.
3. Beregovoy, A.M. Thermal properties of cladding in the hot and cold climate / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, Ju.P. Skachkov // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – No. 4(37). – P. 123–127.

4. Beregovoy, A.M. Heat losses through external enclosing structures in the process of air exfiltration / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, M.A. Derina // Privolzhsky scientific journal. – 2017. – No. 2(42). – P. 44.

5. Beregovoy, A.M. Modeling of thermal stability of external fences for assessing heat losses of buildings and microclimate of premises / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – No. 3. – P. 16.

6. Beregovoy, A.M. External enclosing structures in the air exchange system of a residential multi-storey building /A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Modern problems of science and education. – 2015. – №1–1. – P. 24.

7. Derina, M.A. Modeling of various options for insulation of external walls of buildings / M.A. Derina, A.V. Skotnikova // Modeling and mechanics of structures. – 2018. – No. 7. – P. 16.

8. Petryanina L.N. Features of application of external wall constructions in various climatic conditions/ L.N. Petryanina // Education and science in the modern world. Innovations. – 2018. – No. 2(15). – P. 225.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

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

Еремкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: tgv@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

Eremkin Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Heat and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В ЗАЛАХ БОГОСЛУЖЕНИЯ ПРАВОСЛАВНЫХ СОБОРОВ И ХРАМОВ

А.И. Еремкин

Представлены результаты исследований, направленных на решение актуальных проблем борьбы с выделяющимися вредностями в залах богослужения православных соборов и храмов. Предложена новая система комфортного кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции и подачи приточного воздуха в залы по схеме «снизу вверх». В результате такого решения наружный приточный воздух вытесняется вместе с внутренним загрязненным воздухом, выделяющимися вредностями из нижней зоны зала в верхнюю часть помещения и далее удаляется в атмосферу через световые проемы с автоматическими притворами в барабанах куполов храмов и соборов. Исследования подтвердили эффективность системы вытесняющей вентиляции и подачи приточного воздуха по схеме «снизу вверх» за счет обеспечения предельно-допустимых значений вредностей в зоне пребывания прихожан, а также экономии энергетических и материальных ресурсов в результате снижения воздухообменов.

Ключевые слова: кондиционирование воздуха, вытесняющая вентиляция, уровень стратификации, православный собор, зал богослужения, восходящий тепловой поток, температура, относительная влажность, подвижность воздуха, микроклимат, коэффициент доступности приточного воздуха

PECULIARITIES OF APPLICATION OF EXHAUST VENTILATION IN AIR CONDITIONING SYSTEMS IN ORTHODOX CATHEDRALS AND TEMPLES

A.I. Eremkin

The results of the research, to solve the problem of air conditioning pressing in the halls of worship of Orthodox churches and temples are presented. A new system of comfortable air conditioning is proposed as a displacing ventilation and air supply to the halls according to the “bottom-up” scheme. As a result the external supply air is displaced together with the internal

polluted air, emitted by harmful substances from the lower zone of the hall to the upper part of it and then removed in the atmosphere through light openings with automatic vestibules in the domes of temples and cathedrals. The research confirmed the effectiveness of the displacement ventilation system and the supply of fresh air according to the “bottom-up” scheme by ensuring the maximum permissible values of harmfulness for parishioners, as well as saving energy and material resources as a result of reducing air exchanges.

Keywords: air conditioning, displacement ventilation, stratification level, Orthodox Cathedral, worship hall, rising heat flow, temperature, relative humidity, air mobility, microclimate, supply air availability coefficient

Анализ эффективности применяемых схем и систем вентиляции залов богослужения проводился в действующих Спасском кафедральном соборе (рис. 1) и в соборе святых апостолов Петра и Павла в г. Пензе.

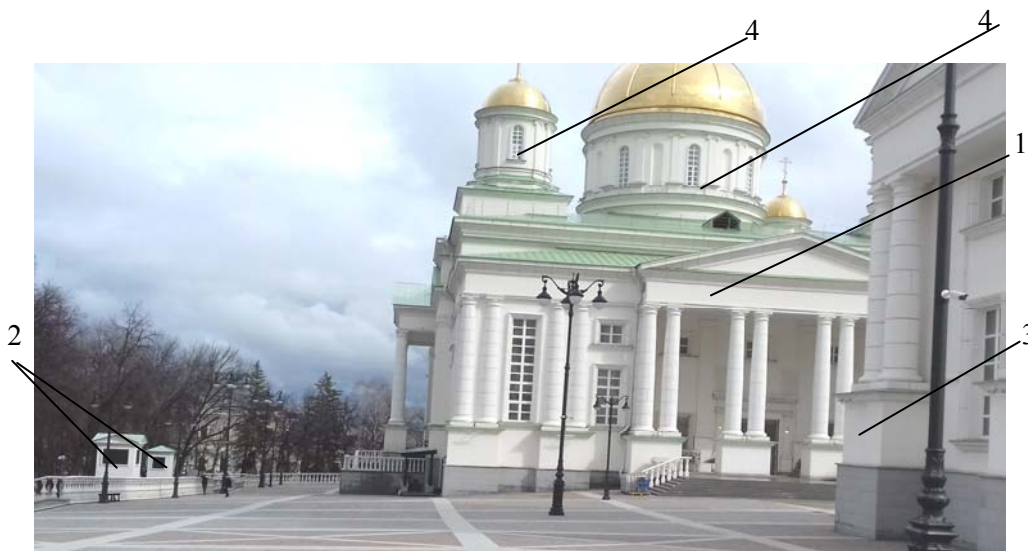


Рис.1. Общий вид Спасского кафедрального собора в г. Пензе:

- 1 – фасад собора; 2 – шахта для забора наружного воздуха; 3 колокольня;
4 – автоматизированные притворы для удаления воздуха из зала богослужения

В Спасском кафедральном соборе запроектировано и внедрено новое направление – локальная система комфортного кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции. Исследования подтвердили эффективность системы вытесняющей вентиляции при наличии в залах богослужения интенсивных восходящих тепловых потоков воздуха, образующихся от поверхности тел прихожан, от систем отопления, хороса, паникадила, освещения, церковного оборудования, кадила пламени свечей, солнечной радиации через окна, стены, купола и др. [1–3].

Исследования подтвердили, что в результате малой изученности принципа применения вытесняющей вентиляции в залах соборов и храмов продолжают использовать системы вентиляции и кондиционирования перемешивающего типа при подаче воздуха «сверху вниз». В этом случае происходит смешивание загрязненного внутреннего воздуха в помещении с чистым приточным наружным в нижней зоне богослужения. В результате применения систем вентиляции и кондиционирования по принципу перемешивания чистого наружного и внутреннего загрязненного воздуха не обеспечиваются создание комфортных условий для прихожан и сохранение архитектурных убранств в залах богослужения соборов и храмов.

Известно, что кроме теплоизбытков основными вредностями, выделяющимися в помещении в теплые и холодные периоды, являются сажа и гарь от свечей, твердые частицы (например пыль), копоть, газы, влага, которые формируются в зоне пребывания людей и оседают, загрязняя стены, своды, иконы, росписи, оборудование, купола, фрески, хоросы, паникадила, светильники и др. [1, 2, 8, 9]. Это приводит к затратам, связанным с уборкой и восстановлением внутреннего убранства залов соборов и храмов. Кроме того, при перемешивающей вентиляции не обеспечиваются требуемые

в центральных залах соборов и храмов параметры температуры $t_{в}$, °С, относительной влажности $\phi_{в}$, %, подвижности $v_{в}$, м/с, и чистоты внутреннего воздуха [1, 5].

Эти обстоятельства придают особую актуальность исследованиям системы кондиционирования воздуха, функционирующей по принципу вытесняющей вентиляции для главного помещения в храмах и соборах, где проходит богослужение и где наблюдается скопление большого количества людей, особенно во время проведения службы. Разработан ряд нормативных документов [4, 6, 7]; кроме того, применительно к зданиям различного назначения в 2020 году Федерацией Европейской ассоциации в области поддержки микроклимата разработан справочник «Вытесняющая вентиляция в производственных зданиях», однако в нем не приведены принципы вытесняющей вентиляции для соборов и храмов с целью поддержания требуемых $t_{в}$, °С, $\phi_{в}$, %, $v_{в}$, м/с, и чистоты внутреннего воздуха.

В ходе данного исследования было предложено применение вытесняющей вентиляции по принципу, когда кондиционированный воздух подается в нижнюю зону зала собора в г. Пензе на отметке до 1,5 метра от пола через каналы или через воздухораспределитель с соударяющимися струями [1, 3]. Такой принцип обеспечивает подачу приточного воздуха с температурой $t_{пр}$, °С, на 1,5–3 °С ниже температуры $t_{в}$, °С, с малыми скоростями $v_{в}=0,2–0,3$ м/с.

Решение системы кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции внедрено в главном зале богослужения Спасского кафедрального собора в г. Пензе (рис. 2).



Рис. 2. Месторасположение приточных воздухораспределителей в главном зале богослужения Спасского кафедрального собора в г. Пензе:
а – восточная сторона собора; б – западная сторона собора;
1 – место подачи приточного воздуха в зал богослужения

При данной схеме воздухообмена «снизу вверх» приточный воздух забирается с улицы через шахты и подается в нижнюю зону зала через воздушные каналы с помощью воздухораспределителя с восточной и западной сторон зала (см. рис. 2), а удаляется сверху – через световые проемы, установленные в барабанах главного и малых куполов (рис. 3). Степень открытия притворов световых проемов регулируется автоматически с помощью электроприводов в зависимости от объема вентилируемого воздуха и количества людей на богослужении.



Рис. 3. Месторасположение автоматизированных притворов в барабане главного купола Спасского кафедрального собора в г. Пензе для удаления воздуха из зала:

- 1 – автоматизированный притвор, установленный в световом проеме;
2 – барабан главного купола

Команды на электропривод притвора в центральный и малый барабаны поступают от центрального пульта управления. В зависимости от количества прихожан в храме может применяться вытесняющая система с механическим притоком и естественной вытяжкой, что более экономично с точки зрения энергозатрат и эффективно для создания комфортных условий пребывания. При вытесняющей вентиляции и схеме воздухообмена «снизу вверх» в зоне пребывания людей сосредотачивается приточный чистый воздух с расчетными параметрами t_v , °C, ϕ_v , %, v_v , м/с. Источники теплоты в нижней и средней зонах создают в центре зала «столб» восходящего конвективного потока воздуха (см. рис. 4), который подхватывает и вытесняет загрязненный воздух в верхнюю зону собора и далее в атмосферу через автоматизированные притворы, установленные в окнах барабанов куполов.

Установлено, что при вытесняющей вентиляции струи приточного воздуха с низкой турбулентностью и скоростью $v_v=0,2-0,3$ м/с незначительно подхватывают окружающий нижний загрязненный воздух, что не способствует перемешиванию приточного (чистого) воздуха в нижней зоне с внутренним загрязненным воздухом помещения. В результате образуется уровень стратификации чистого воздуха на высоте до 2,5 метра от пола, где параметры приточного воздуха практически не меняются и остаются расчетными и воздух остается чистым. Для эффективной работы вытесняющей вентиляции объем приточного воздуха, подаваемого в нижнюю зону, должен равняться сумме объемов воздуха в восходящих конвективных потоках.

В системе вытесняющей вентиляции соборов и храмов «столб» восходящей конвекции делит помещение на две зоны – верхнюю (загрязненную вредностями) и нижнюю (состоящую из чистого воздуха), граница между зонами называется уровнем стратификации. Верхняя зона выше уровня стратификации, характеризуется наличием рециркуляционных потоков с интенсивным перемешиванием воздушных потоков.

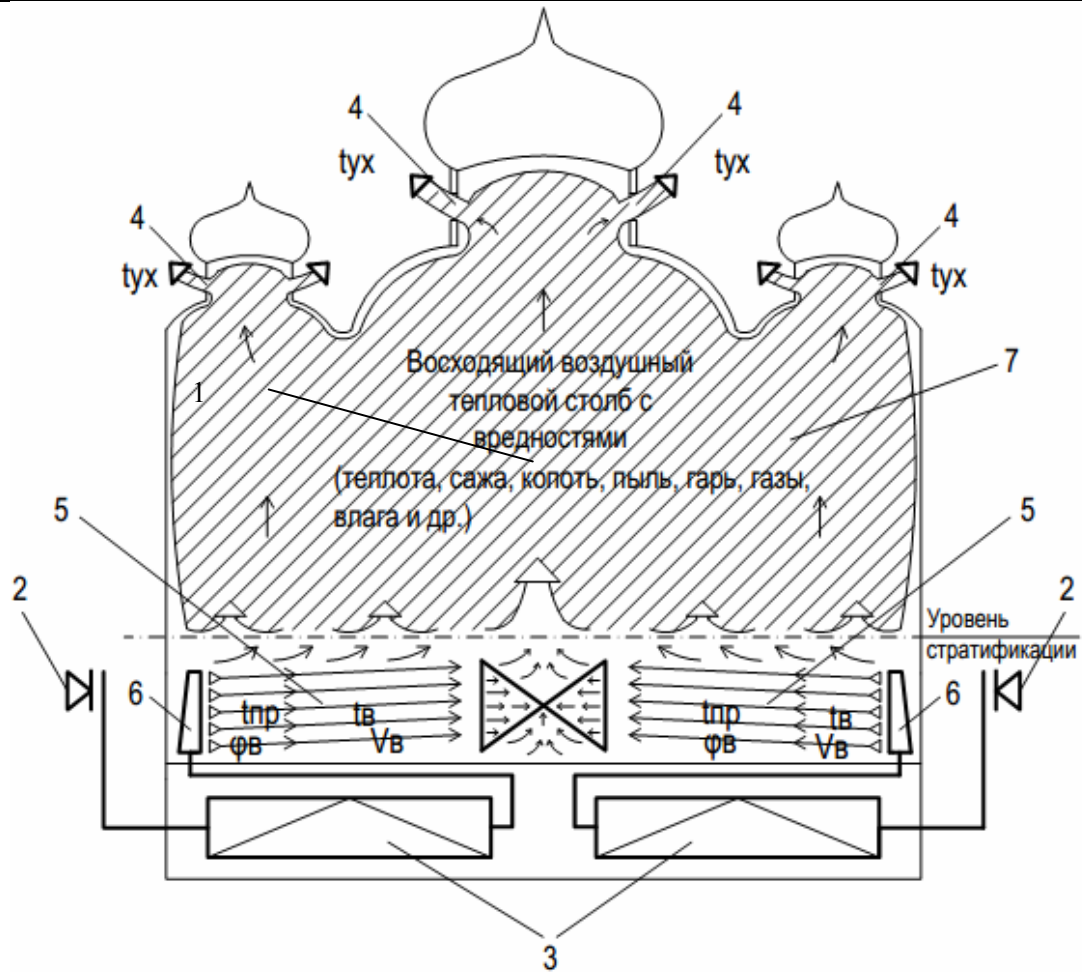


Рис. 4. Схема движения воздушного теплового потока в зале богослужения Спасского кафедрального собора в г. Пензе:

1 – зал богослужения собора; 2 – воздухозаборная шахта; 3 – установки кондиционирования воздуха; 4 – световой проем с автоматизированным притвором; 5 – зона чистого приточного воздуха; 6 – воздухораспределительный канал; 7 – верхняя воздушная загрязненная зона

Из проведенного анализа следует, что применение системы вытесняющей вентиляции в зале собора дает значительные преимущества по сравнению с перемешивающей вентиляцией за счет высокого качества воздуха в зоне ниже уровня стратификации (в зоне пребывания прихожан) и экономии материальных и энергоресурсов в результате снижения воздухообменов. Снижение воздухообменов происходит за счет того, что расчет воздухообменов осуществляется только для ассимиляции вредных веществ, которые поступают в нижнюю зону уровня стратификации на высоте 2,0–2,5 метра от пола. Теплота и другие вредности, поступающие выше 2,0–2,5 метра, в расчете воздухообменов не учитываются. Это позволяет сократить производительность системы кондиционирования воздуха в 2–3 раза, что является экономически выгодно.

При вытесняющей вентиляции в зале собора за счет тепловыделений от оборудования и приборов, а также теплоступлений от солнечной радиации через стены, окна и купола внутренний воздух нагревается и поднимается вверх, а затем удаляется через притворы наружу. В ходе проведенного исследования было установлено, что «столб» загрязненного восходящего потока теплого воздуха формируется ближе к середине зала и не омывает стены, иконы, фрески, архитектурные элементы, при этом сохраняется их привлекательный внешний вид.

Известно, что значения параметров микроклимата $t_{в}$, °C, $\phi_{в}$, %, $v_{в}$, м/с, в зале собора или храма оказывают существенное влияние на физиологическое состояние прихожан [8], также известно, что самочувствие человека определяется условием

теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Для комфортного самочувствия за счет t_b , °С, ϕ_b , %, v_b , м/с, необходимо обеспечить равенство между теплопродукцией человека и теплоотдачей от него в окружающую среду. Подача приточного воздуха с параметрами $t_{пр}$, °С, $\phi_{пр}$, %, $v_{пр}$, м/с, с помощью вытесняющей вентиляции в зону пребывания людей (ниже уровня стратификации) решает проблему улучшения санитарно-гигиенических условий в залах соборов и храмов.

Проведенное исследование показало, что применение системы по типу вытесняющей вентиляции позволяет наиболее эффективно использовать приточный воздух, при этом K_d – коэффициент доступности приточного воздуха в рабочую зону – приближается к значению, равному единице.

$$K_d = \frac{l_{pz}}{l_{пр}}, \quad (1)$$

где l_{pz} – объем воздуха, поступившего в рабочую зону, м³/ч; $l_{пр}$ – объем приточного воздуха, подаваемого в зал, м³/ч.

При перемешивающей вентиляции и схеме воздухообмена «сверху вниз» величина коэффициента K_d значительно меньше единицы, так как чистый приточный воздух не полностью достигает зоны пребывания прихожан. При заполнении нижней зоны зала собора свежим приточным воздухом и вытеснении теплоизбытков и других вредностей в верхнюю зону (выше уровня стратификации) образуется тепловая подушка с температурой до 3–5 °С, выше температуры в зоне пребывания прихожан. В результате использования перемешивающей вентиляции по схеме «сверху вниз» тепловая подушка формируется ближе или ниже уровня стратификации, это затрудняет обеспечение требуемых параметров микроклимата t_b , °С, ϕ_b , %, v_b , м/с, и ухудшает тепловую и санитарно-гигиеническую обстановку в зале пребывания прихожан. Это усиливает мощность конвективного «столба» прогретого воздуха.

При схеме воздухообмена «сверху вниз» в расчете воздухообменов необходимо учитывать все теплопоступления и вредности, поступающие в зал собора. Это приводит к значительному увеличению объема вентилируемого воздуха, требует применения крупного вентиляционного оборудования и значительных энергозатрат, что экономически невыгодно. При вытесняющей вентиляции и схеме воздухообмена «снизу вверх» при расчете воздухообменов учитывают до 55% вредностей, которые поступают в зону ниже уровня стратификации [1, 3].

Кроме того, в ходе проведенного исследования установлено, что применение вытесняющей вентиляции и схемы воздухообмена «снизу вверх» уменьшается концентрация загрязнений ниже уровня стратификации до 70%. В результате улучшается качество воздуха, так как теплота, пыль, гарь, сажа, газы, влага и другие вредности вытесняются из нижней зоны в верхнюю, к местам удаления. Из представленных в статье результатов исследования можно сделать вывод, что система вентиляции вытесняющего типа и схема воздухообмена «снизу вверх» улучшает качество внутреннего воздуха и обеспечивает экономию энергоресурсов на кондиционирование воздуха соборов и храмов по сравнению с перемешивающей вентиляцией и схемой воздухообмена «сверху вниз». Следовательно, можно утверждать, что для эффективной борьбы с существующими вредностями в залах богослужения соборов и храмов и создания комфортных условий для прихожан наиболее эффективным является применение вытесняющей вентиляции в сочетании с кондиционированием воздуха и естественным удалением загрязненного воздуха из верхней зоны.

Список литературы

1. Петрова, К.А. Разработка комбинированной естественно- механической вытесняющей вентиляции в соборе святых апостолов Петра и Павла в г.Пензе / К.А. Петрова, А.И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2019. – 10 с.

2. Чем дышат храмы? Благовест. – Режим доступа: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>, свободный – (11.01.2020).
3. Фильчакина, И.Н. Технологическое кондиционирование воздуха локальным способом по типу вытесняющей вентиляции текстильных предприятий: монография / И.Н. Фильчакина, А.И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 204 с.
4. СП 31-103 – 99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов / Госстрой России. – М.: АХЦ «Арххраам», ГУП ЦПП, 2000.
5. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов: дис. ... д-ра техн. наук: 05 23 03 / А.Г. Кочев, Нижегородск. гос. арх.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2006.
6. АВОК Стандарт – 2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: отраслевой стандарт: дата введения НП «АВОК» 09.06.04. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004. – 14 с.
7. МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т.2. Православные храмы и комплексы / Архитектурно-художественный центр Московской Патриархии; сост. М.Ю. Кеслер. – М.: Технорматив, 2008. – 194 с.
8. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов: монография / А.Г. Кочев. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2004. – 449 с.
9. Кочев, А.Г. Влияние внешней аэродинамики на микроклимат православных храмов / А.Г. Кочев, М.М. Соколов. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2017. – 188 с.

References

1. Petrova, K.A. Development of combined natural-mechanical displacement ventilation in the Cathedral of the Holy Apostles Peter and Paul in Penza / K.A. Petrova, A.I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2019 – 10p.
2. How do temples «breathe»? The gospel. – Access mode: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>, free – (11.01.2020).
3. Filchakina, I.N. Technological air conditioning in a local way by the type of displacing ventilation of textile enterprises: monograph / I.N. Filchakina, A.I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2012. – 204 p.
4. SP 31 – 103 – 99. Buildings, structures and complexes of Orthodox churches / Gosstroy of Russia. – М.: The Arkhkhraam Art Center, State Unitary Enterprise, 2000.
5. Kochev, A.G. The microclimate of Orthodox churches: Diss. ... Dr. tech. Sciences: 05 23 03. / A.G. Kochev, Nizhny Novgorod. state arch. un-t – Nizhny Novgorod, 2006.
6. ABOK Standard – 2-2004. Orthodox churches. Heating, ventilation and air conditioning: industry standard: date of introduction of NP ABOK 09.06.04. – М.: ABOK-PRESS, 2004. – 14 p.
7. MDS 31-9.2003. Orthodox churches. Т.2. Orthodox churches and complexes / Architectural and Art Center of the Moscow Patriarchate; compiled by M.Y. Kesler. – М.: Technical Standard, 2008. – 194 p.
8. Kochev, A.G. The microclimate of Orthodox churches: monograph / A.G. Nomad. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2004. – 449 p.
9. Kochev A.G. The influence of external aerodynamics on the microclimate of Orthodox churches / A.G. Kochev, M.M. Sokolov. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2017. – 188 p.

УДК 628.16

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

Бикунова Марина Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

Кошев Александр Николаевич,
Доктор химических наук, профессор
кафедры «Инженерно-вычислительные
системы»
E-mail: koshev@pguas.ru

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

Перельгин Юрий Петрович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Химия»
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.

Bikunova Marina Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

Koshev Alexander Nikolaevich,
Doctor of Chemistry Science, Professor of the
department «Information and Computing
Systems»
E-mail: koshev@pguas.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 56-35-11; fax: (8421) 56-51-22

Perelygin Yuriy Petrovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Chemistry»
E-mail: pyp@pnzgu.ru

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. Перельгин

Исследована комбинированная технология удаления аммонийного азота из городских сточных вод с применением окислителей и биологической очистки в аэротенке. Экспериментально установлено, что при обработке кислородосодержащей сточной воды хлором с дозами до 10 мг/л в течение 8–10 минут при давлении $4 \cdot 10^5$ Па концентрация ионов NH_4^+ снижается на 60% от начальных значений. Последующая биологическая очистка стоков в аэротенке с использованием иловоздушной смеси, предварительно обработанной в поле постоянного электрического тока напряжением на электродах 36 В и расходом электричества $19 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³, позволяет снизить остаточные концентрации аммонийного азота в очищенных стоках до 1 мг/л и значительно уменьшить степень эвтрофикации поверхностных водоёмов в районе расположения канализационных очистных сооружений.

Ключевые слова: городские сточные воды, аммонийный азот, комбинированная очистка, окислители, избыточное давление, аэротенки, электрообработка активного ила

REMOVAL AMMONIUM NITROGEN FROM URBAN WASTEWATER USING PHYSICAL-CHEMICAL AND BIOLOGICAL METHODS

B.M. Grishin, M. V. Bikunova, A. N. Koshev, Yu. P. Perelygin

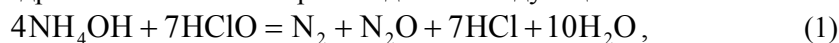
The combined technology for the removal of ammonia nitrogen from urban wastewater using oxidizing agents and biological treatment in aeration tanks has been investigated. It was experimentally established that when oxygen-containing wastewater is treated with chlorine with doses up to 10 mg / l for 8-10 minutes at the pressure of $4 \cdot 10^5$ Pa, the concentration of NH_4^+ ions decreases by 60% from the initial values. Subsequent biological treatment of wastewater in an aeration tank using a sludge-air mixture pre-treated in a field of constant electric current with a voltage of 36 V electrodes and an electricity consumption of $19 \cdot 10^{-4}$ A·h / m^3 , allows to reduce residual concentrations of ammonia nitrogen in treated effluents to 1 mg / l and significantly reduce the degree of eutrophication of surface water bodies in the area of sewage treatment plants.

Keywords: municipal wastewater, ammonia nitrogen, combined treatment, oxidizing agents, overpressure, aeration tanks, electric treatment of activated sludge

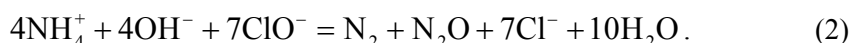
Городские сточные воды являются одним из основных источников загрязнений поверхностных сточных водоёмов. Присутствие азота в сбрасываемых стоках и его последующее попадание в водоёмы нарушает в последних природное биологическое равновесие, изменяет кислородный режим за счёт массового развития микроводорослей и тормозит процессы естественного самоочищения. Как правило, городские сточные воды очищаются от находящихся в них органических примесей с помощью биологических методов, но при этом азот остаётся в очищенных стоках, изменяя только свою форму с аммонийной на нитритную и нитратную [1]. Денитрификация стоков биологическими методами требует дополнительных капитальных вложений и значительно удорожает себестоимость очистки [2, 3]. Таким образом, удаление аммонийного азота до его перехода в нитратную форму в сточных водах является весьма актуальной задачей.

Было проведено исследование технологии удаления из городских стоков аммонийного азота, сочетающей предварительное снижение ионов NH_4^+ физико-химическим методом и последующее удаление азотосодержащих примесей биологической очисткой в режиме работы аэротенка-вытеснителя с активацией возвратного ила.

При решении проблемы удаления аммонийного азота на стадии механической очистки наибольший интерес представляет обработка сточных вод окислителями, изменяющими рН и Eh жидкой фазы. Например, при введении в воду газообразного хлора или хлорной воды в нейтральной среде образуется хлорноватистая кислота, оказывающая сильное окислительное воздействие на ионы аммония. Реакция хлорноватистой кислоты с гидроокисью аммония происходит по следующей схеме:



или в ионной форме



Изменение энергии Гиббса в реакции (2) составляет порядка (-1980 кДж/моль), что свидетельствует о высокой скорости процесса. Единственной проблемой при данном способе обработки сточной воды является необходимость снижения доз хлорсодержащих реагентов, которое может быть достигнуто проведением процесса удаления ионов NH_4^+ под избыточным давлением в присутствии кислорода воздуха.

Изменение энергии Гиббса при движении кислородосодержащей сточной жидкости в условиях повышенного давления записывается в виде

$$\Delta G = RT \cdot \lg \frac{C_2}{C_1}, \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·град; T – абсолютная температура жидкости, °К; C_1 и C_2 – соответственно пределы растворимости кислорода в сточной воде при атмосферном и избыточном давлениях, мг/л.

Анализ уравнения (3) показывает, что при движении кислородонасыщенной сточной воды в напорном трубопроводе абсолютная величина энергии Гиббса повышается, что должно способствовать ускорению процесса удаления аммонийного азота при последующем вводе хлорсодержащего реагента. Кроме того, наличие повышенных концентраций кислорода увеличивает Eh жидкой фазы, создавая тем самым благоприятные условия для сокращения требуемых доз хлора.

Для определения степени влияния избыточного давления кислородонасыщенной сточной жидкости на процесс удаления ионов NH_4^+ хлорсодержащими реагентами были проведены лабораторные исследования на установке, смонтированной на канализационных очистных сооружениях (КОС) г. Заречного Пензенской области. В состав установки входили приемный бак, насос-компрессор, напорный бак и сборный резервуар обработанных сточных вод. Насыщение сточной жидкости кислородом воздуха под избыточным давлением от $1 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^5$ Па осуществлялось в напорном баке в течение 4–5 минут. Хлорсодержащий реагент (хлорная вода) вводился в сборный резервуар, т.е. после снятия компрессии. Дозы хлора для удаления аммонийного азота в экспериментах составляли от 5 до 10 мг/л. На рис. 1 приведены диаграммы, характеризующие скорость деаммонификации при начальной концентрации ионов NH_4^+ в сточной воде, равной 24,5 мг/л. Как видно из диаграмм, в течение 8–10 мин после ввода хлорсодержащего реагента в сточную воду происходит плавное снижение концентраций ионов аммония, а затем процесс деаммонификации прекращается. Анализы показали полное отсутствие хлора в отобранных пробах после 20 минут его контакта со сточной водой.

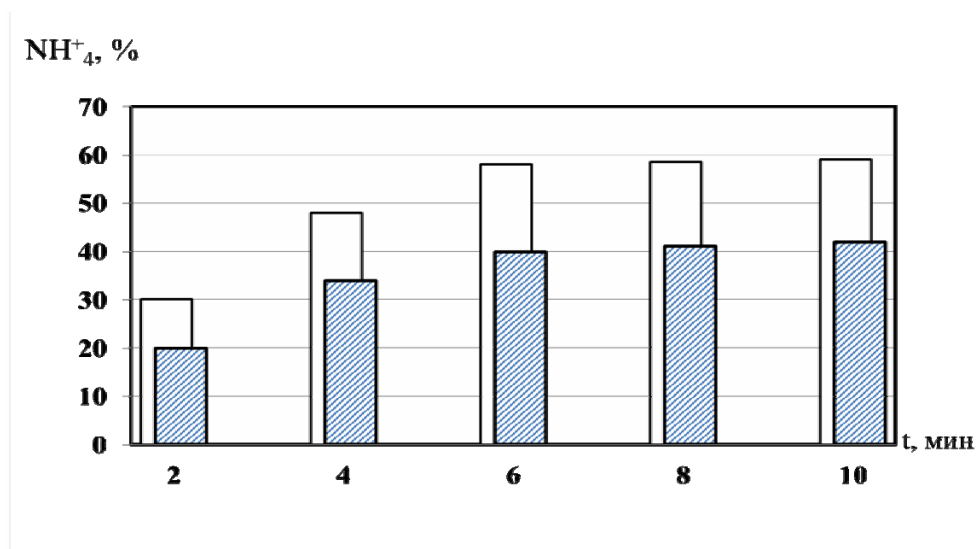




Рис. 1. Эффективность удаления аммонийного азота в процентах от начального значения после снятия компрессии величиной $p=4 \cdot 10^5$ Па в кислородонасыщенной сточной жидкости при вводе хлора с дозами  – $D_{chl} = 5$ мг/л,  – $D_{chl} = 10$ мг/л

Исследования по кинетике изъятия аммонийного азота в процессе биологической очистки сточных вод проводились на лабораторной установке, состоящей из опытного и контрольного модельных аэротенков ёмкостью по $0,1 \text{ м}^3$ каждый, приёмного бака исходных стоков, повысительного насоса активного ила, компрессоров, дозирующих бачков, трубопроводов и арматуры. В контрольный и опытный аэротенки возвратный ил подавался по трубопроводу из вторичного отстойника КОС г. Заречного. Перед опытным аэротенком в возвратный ил дополнительно вводился сжатый воздух, и полученная иловоздушная смесь поступала для обработки постоянным током в электрогидродинамическое устройство (ЭГДУ), конструкция которого приведена в работах [4, 5]. Напряжение на электродах ЭГДУ изменялось от 15 до 36 В.

В ходе экспериментов решались следующие задачи:

- определение влияния доз активного ила и начальной концентрации ионов NH_4^+ на кинетику деаммонификации стока в процессе биологической очистки;
- установление влияния степени электрообработки насыщенного кислородом возвратного активного ила на эффективность удаления аммонийных ионов из городских сточных вод.

Время пребывания иловой смеси в опытном и контрольном аэротенках составляло 5 ч, концентрация кислорода в аэротенках поддерживалась на уровне 2,3–2,5 мг/л. Концентрация ионов NH_4^+ в исходной воде в первой серии экспериментов составляла 28 мг/л, во второй серии – 11,2 мг/л (за счёт предварительной физико-химической обработки).

Диаграммы изменения концентрации ионов NH_4^+ в процессе биологической очистки в контрольном аэротенке при дозах возвратного ила $D_{\text{ан}}$ 2,0 и 3,5 г/л с концентрацией кислорода в иле $D_{\text{к}}=0,2$ мг/л показаны на рис. 2 и 3.

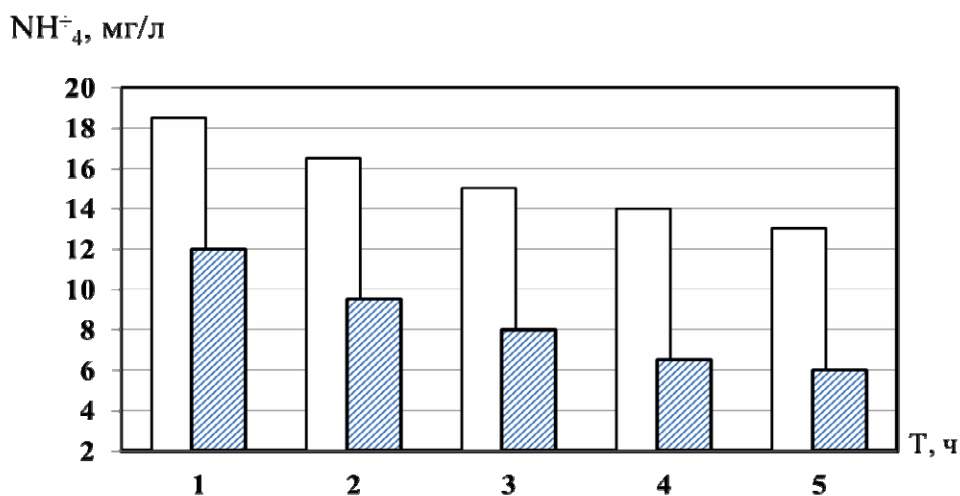


Рис. 2. Изменение концентрации аммонийного азота в сточной воде при биологической очистке в опытном аэротенке с начальной концентрацией ионов NH_4^+ 28 мг/л и дозами активного ила $D_{\text{ан}} = 2$ г/л, $D_{\text{ан}} = 3,5$ г/л

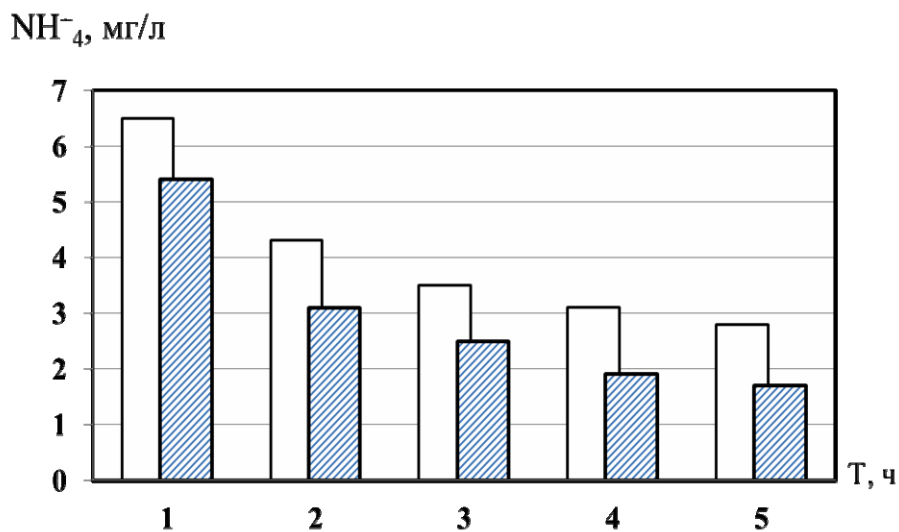


Рис. 3. Изменение концентрации аммонийного азота в сточной воде при биологической очистке в опытном аэротенке с начальной концентрацией ионов NH_4^+ 11,2 мг/л и дозами активного ила $D_{\text{ан}} = 2$ г/л, $D_{\text{ан}} = 3,5$ г/л

Анализ диаграмм на рис. 2 и 3 позволил сделать следующие выводы:

1. При снижении концентрации аммонийных ионов в исходной сточной воде физико-химическим методом в 2,5 раза (с 28 мг/л до 11,2 мг/л) остаточные концентрации ионов NH_4^+ в биологически очищенных стоках уменьшаются в 3,8–4,8 раза.

2. Увеличение дозы возвратного ила с 2,0 г/л до 3,5 г/л позволяет снизить остаточные концентрации аммонийного азота после очистки в аэротенке в 1,75–2,25 раза (до 1,6 мг/л).

Эксперименты по биологической очистке в опытном аэротенке были проведены на городских стоках с начальными концентрациями ионов NH_4^+ 28 и 11,2 мг/л и дозой возвратного активного ила $D_{\text{ан}} = 2,0$ г/л.

В первой серии экспериментов возвратный активный ил, поступающий в опытный аэротенк, только насыщался кислородом без обработки в ЭГДУ. Было установлено, что увеличение концентрации кислорода в возвратном активном иле с $D_{\text{к}} = 0,2$ мг/л до $D_{\text{к}} = 6,5$ мг/л (т.е. в 32,5 раза) приводит к незначительному снижению остаточных концентраций аммонийного азота в биологически очищенных стоках (не более 10%).

Во второй серии экспериментов по деаммонизации при биологической очистке в опытном аэротенке возвратный активный ил предварительно насыщался кислородом до 6,0–6,5 мг/л и обрабатывался постоянным электрическим током в ЭГДУ при напряжении на электродах $U=15$ В и $U=36$ В. Удельное количество электричества на обработку ила соответственно было равно $q=7 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³ и $q=19 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³. Доза активного ила в обработанной электрическим током иловоздушной смеси, поступающей в контрольный аэротенк, составляла 2 г/л. Диаграммы изменения концентраций ионов NH_4^+ в контрольном аэротенке при биологической очистке городских сточных вод показаны на рис. 4 и 5.

NH_4^+ , мг/л

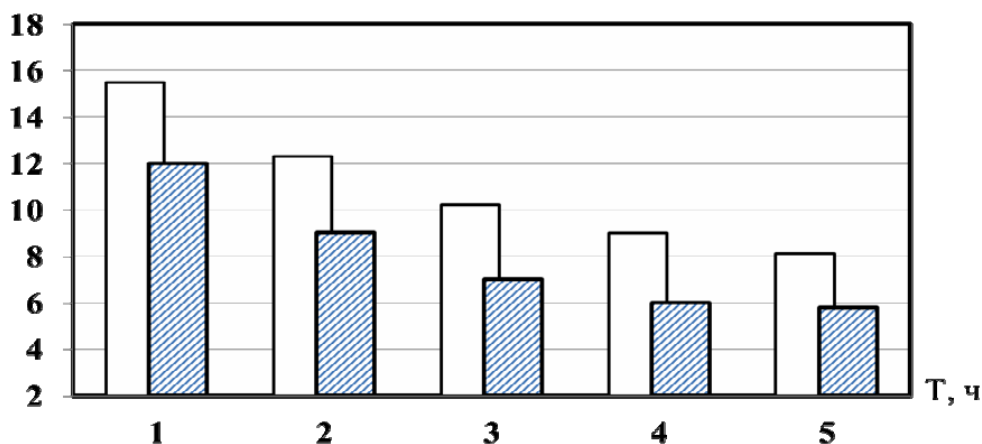


Рис. 4. Изменение концентраций аммонийного азота в сточной воде при биологической очистке в опытном аэротенке с начальной концентрацией ионов NH_4^+ 28 мг/л и дозой активного ила 2 г/л, предварительно обработанного в ЭГДУ при:

□ – $U=15$ В, $q=7 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³, ▨ – $U=36$ В, $q=19 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³

Анализ диаграмм на рис. 4 и 5 показал следующее:

1. Увеличение напряжения с 15 до 36 В и удельного количества электричества до $19 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³ при обработке кислородонасыщенного возвратного активного ила приводит к снижению остаточных концентраций ионов NH_4^+ в биологически очищенных стоках в 2,3–2,8 раза по сравнению с использованием необработанного возвратного активного ила при одинаковых дозах $D_{\text{ан}} = 2,0$ г/л.

2. Предварительное снижение начальной концентрации ионов NH_4^+ в исходном стоке физико-химическими методами до 11,2 мг/л с использованием в аэротенке обработанного в ЭГДУ кислородонасыщенного активного ила значительно увеличивает глубину изъятия аммонийных ионов до остаточных концентраций 1,0–1,7 мг/л и

позволяет осуществлять эффективный процесс деаммонизации при сравнительно небольших дозах активного ила (2 г/л).

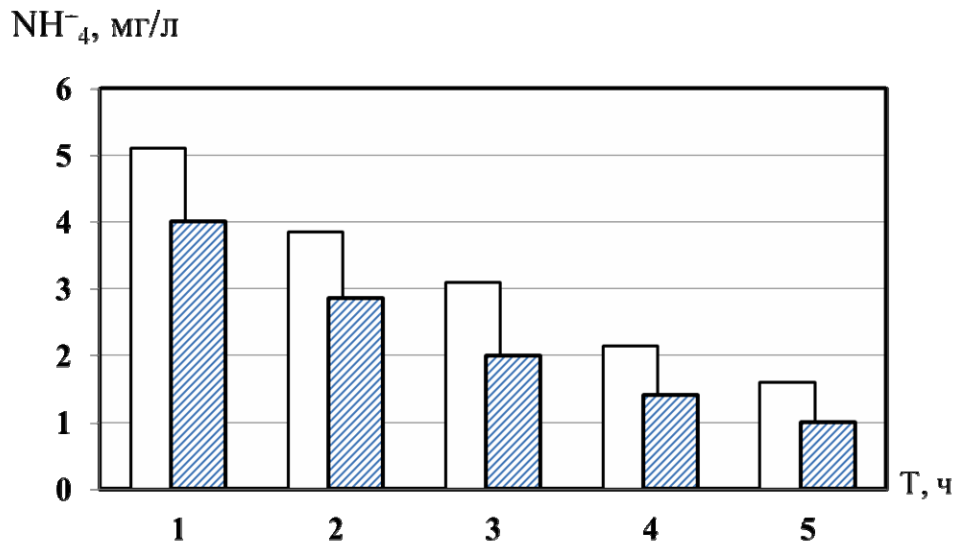


Рис. 5. Изменение концентраций аммонийного азота в сточной воде при биологической очистке в опытном аэротенке с начальной концентрацией ионов NH_4^+ 11,2 мг/л и дозой активного ила 2 г/л, предварительно обработанного в ЭГДУ при:

□ – $U=15$ В, $q=7 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³, ▨ – $U=36$ В, $q=19 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³

Анализ состава очищенных сточных вод также показал, что снижение концентрации ионов NH_4^+ в исходном стоке с последующей его обработкой в опытном аэротенке сокращает количество нитратных и нитритных ионов в очищенной воде в 1,10–1,15 раза по сравнению с контрольным аэротенком, работающим с дозами активного ила 3,5 г/л.

На основании экспериментальных данных предложена технологическая схема комбинированной очистки городских сточных вод с глубоким удалением аммонийного азота физико-химическим и биологическим методами, которая показана на рис. 6.

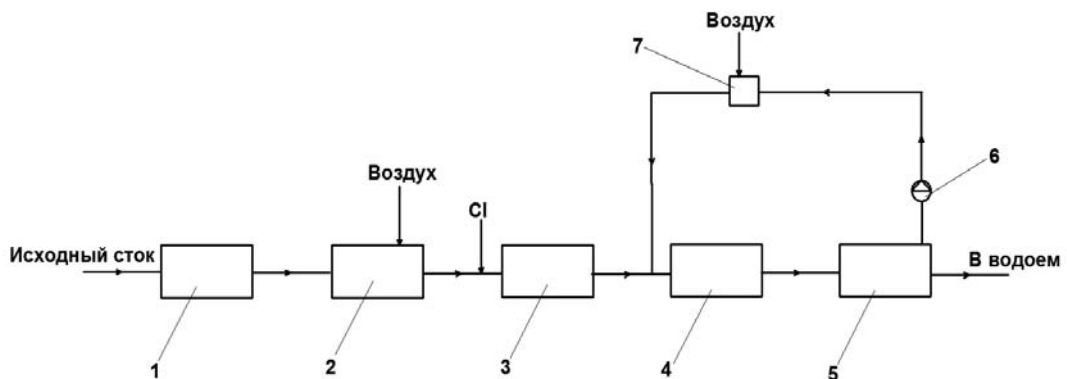


Рис. 6. Схема комбинированной физико-химической и биологической очистки городских сточных вод с глубоким удалением ионов NH_4^+ :

1 – приёмный резервуар; 2 – насосная станция; 3 – первичный отстойник; 4 – аэротенк; 5 – вторичный отстойник; 6 – насос возвратного активного ила; 7 – ЭГДУ; Cl – ввод хлора

Исходная сточная вода поступает в приёмный резервуар 1 и далее насосами перекачивается в камеру гашения напора первичных отстойников 3. На байпасной линии насосов устанавливаются эжекторы, через которые в необходимом количестве поступает атмосферный воздух, смешивается со сточной водой и переходит в растворённое состояние в напорном трубопроводе, соединяющем насосную станцию 2 с первичными отстойниками 3. В этот же трубопровод подаётся хлорная вода с дозой

активного хлора до 10 мг/л. После физико-химической обработки и первичного отстаивания сток поступает в аэротенк 4, где происходят окисление органических примесей и процесс нитрификации биологическим методом. С целью глубокого удаления аммонийного азота поток возвратного активного ила, перекачиваемый насосом 6 из вторичного отстойника 5, насыщается воздухом и обрабатывается постоянным электрическим током в ЭГДУ 7.

Предлагаемая технологическая схема позволяет снизить концентрацию аммонийного азота в очищенных стоках до 1 мг/л и значительно уменьшить степень эвтрофирования водоёмов, куда поступают очищенные стоки.

ВЫВОДЫ

1. При вводе хлора с дозами до 10 мг/л в обрабатываемые городские сточные воды, предварительно насыщенные кислородом при избыточном давлении $4 \cdot 10^5$ Па, в течение 8–10 мин происходит плавное снижение концентраций аммонийного азота, при этом эффективность удаления ионов NH_4^+ достигает 60%.

2. Предварительное снижение ионов NH_4^+ физико-химическим методом в 2,5 раза позволяет значительно ускорить процесс деаммонизации стоков в процессе их биологической очистки. Наиболее значимое снижение концентраций ионов NH_4^+ (до 1 мг/л) наблюдается при использовании в аэротенке возвратного активного ила с кислородонасыщением до 6,5 мг/л, обрабатываемого в ЭГДУ с напряжением на электродах 36 В и удельным расходом электричества $19 \cdot 10^{-4}$ А·ч/м³.

3. Предложена технологическая схема комбинированной очистки городских сточных вод с глубоким удалением аммонийного азота физико-химическим и биологическим методами, позволяющая значительно уменьшить степень эвтрофикации поверхностного водоёма при сбросе в него очищенных стоков.

Список литературы

1. Харьковина, О.В. Проблемы проектирования сооружений биологической очистки с удалением азота и фосфора / О.В. Харьковина // 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. Швецов, В.Н. Расчёт сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод в аэротенках с удалением биогенных элементов / В.Н. Швецов, К.М. Морозова, С.В. Степанов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – №9. – С. 26–40.

4. Гришин, Б.М. Применение вихревых смесительных устройств в технологиях механической и физико-химической очистки сточных вод / Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, Н.Н. Ласьков, Н.Г. Вилкова, Ю.П. Перелыгин // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2(27). – С. 112–117.

5. Гришин, Б.М. Биологическая очистка хозяйственно-бытовых сточных вод с использованием вихревых смесительных устройств / Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, В.Г. Камбург, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №3(28). – С. 143–148.

References

1. Kharkina, O.V. Problems of designing biological treatment facilities with the removal of nitrogen and phosphorus / O.V. Kharkina // Water supply and sanitary equipment. – 2019. – №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. – № 5. – P. 44–53.

3. Shvetsov, V.N. Calculation of biological treatment facilities for urban and industrial wastewater in aeration tanks with the removal of nutrients / V.N. Shvetsov, K.M. Morozova, S.V. Stepanov // Water supply and sanitary equipment. – 2018. – №9. – P. 26–40.

4. Grishin, B.M. The use of vortex mixing devices in the technologies of mechanical and physico-chemical wastewater treatment / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, N.N. Laskov, N.G. Vilkova, Yu.P. Pereygin // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 2 (27). – P. 112–117.

5. Grishin, B.M. Biological treatment of domestic wastewater using vortex mixing devices / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, V.G. Camburg, A.N. Koshev // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 3 (28). – P. 143–148.

УДК 628.3

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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Князев Александр Анатольевич,
старший преподаватель кафедры
«Инженерная экология»

Долгушев Максим Сергеевич,
магистрант кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»

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

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

Knyazev Alexander Anatolyevich,
Senior Lecturer of the department
«Engineering Ecology»

Dolgushev Maksim Sergeyeovich,
Undergraduate of the department «Water
Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ФЕРАТА НАТРИЯ В АНОДНЫХ ЯЧЕЙКАХ МЕМБРАННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Князев, М.С. Долгушев

Приведены результаты экспериментальных исследований технологического процесса электрохимического синтеза феррата натрия в анодных ячейках мембранного электролизера. Показано, что увеличение анодной плотности тока с $i = 100 \text{ А/м}^2$ до $i = 400 \text{ А/м}^2$ приведет к сокращению продолжительности процесса электрохимической обработки 40% водного раствора гидроксида натрия, позволяющего достичь концентрации феррата натрия $c_f = 10 \text{ г/л}$, с $T = 6 \text{ ч}$ до $T = 1,5 \text{ ч}$, величина коэффициента выхода феррата потока при этом увеличивается с $K_v = 0,26-0,36$ до $K_v = 0,38-0,45$. Получены математические зависимости величины концентрации феррата натрия в электролите от продолжительности процесса электрообработки. Использование предложенной методики расчета позволит оптимизировать процесс электрохимической генерации феррата натрия.

Ключевые слова: феррат натрия, коэффициент выхода, электрохимическое окисление, мембранный электролизер, анодная плотность тока, железный анод

TECHNOLOGICAL PROCESS STUDY OF SODIUM FERRATE ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS IN ANODE CELLS OF A MEMBRANE ELECTROLYZER

S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, A.A. Knyazev, M.S. Dolgushev

The results of experimental studies of the technological process of the electrochemical synthesis of sodium ferrate in the anode cells of a membrane electrolyzer are presented. It was shown that an increase in the anode current density from $i = 100 \text{ A} / \text{m}^2$ to $i = 400 \text{ A} / \text{m}^2$ will lead to a reduction in the duration of the electrochemical treatment of a 40% aqueous solution of sodium hydroxide, which allows to achieve a concentration of sodium ferrate $c_f = 10 \text{ g} / \text{l}$ with

$T = 6$ hours to $T = 1.5$ hours, the value of the yield coefficient of the ferrate of the stream increases from $K_v = 0.26-0.36$ to $K_v = 0.38-0.45$. Mathematical dependences, the concentration of sodium ferrate in the electrolyte on the duration of the electric processing, are obtained. Using the proposed calculation method will optimize the process of electrochemical generation of sodium ferrate.

Keywords: sodium ferrate, yield coefficient, electrochemical oxidation, membrane electrolyzer, anode current density, iron anode

Специалистами Пензенского государственного университета архитектуры и строительства была разработана новая технология электроактивационной обработки водного раствора гидроксида натрия в мембранном электролизере, позволяющего получить высокоэффективный реагент окислитель – щелочной раствор феррата натрия [1].

Ранее были проведены лабораторные исследования зависимости значения электропроводности электрохимической ячейки лабораторной установки для получения окислителя феррата натрия от концентрации обрабатываемого электролита и его температуры [2].

Необходимость оптимизации параметров технологии электрохимического синтеза феррата натрия потребовала проведения экспериментальных исследований процесса электроактивационной обработки водного раствора гидроксида натрия в анодных ячейках, созданных в лабораторной установке.

Лабораторные исследования технологического процесса электрохимического синтеза феррата натрия проводились на установке, схема которой изображена на рис. 1.

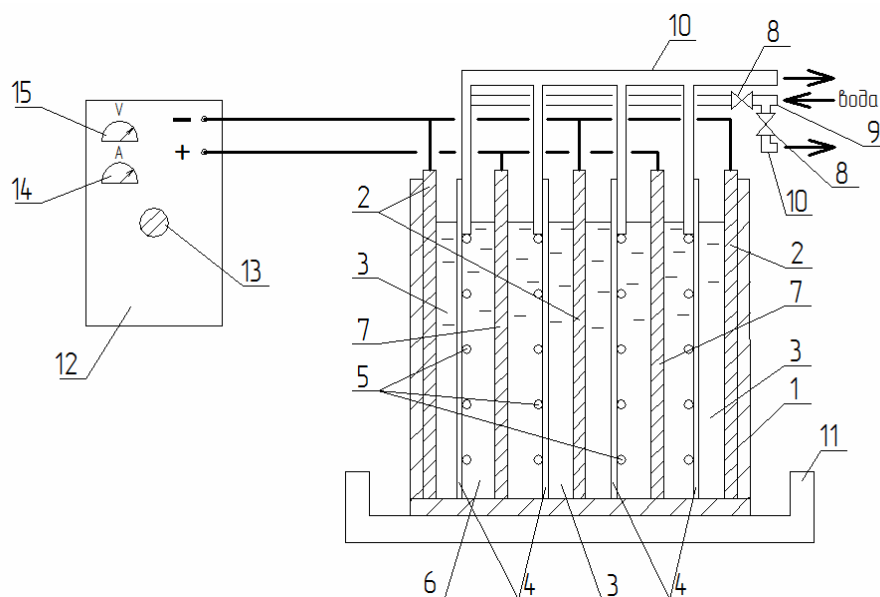


Рис. 1. Схема установки для исследования процесса электрохимического синтеза феррата натрия

Общий вид установки для исследования процесса электрохимического синтеза феррата натрия представлен на рис. 2.

Установка для исследования процесса электрохимического синтеза феррата натрия включает в себя: электролизер, состоящий из корпуса 1, в котором установлены три пластинчатых катода 2 и два пластинчатых анода 7. Четыре неселективные мембранные токопроводящие перегородки 4 гидравлически разделяют объем электролизера на три катодных 3 и две анодных 6 камеры. На поверхности мембранных перегородок 4 закреплены трубчатые системы охлаждения 5, подключенные к коллекторам 9 и 10 для подачи и отвода охлаждающей воды. С помощью кранов осуществлялась регулировка расхода воды, подаваемой в трубчатую систему охлаждения. Корпус электролизера 1 устанавливался в поддон 11. Клеммы пластинчатых электродов (катодов и анодов) подключались к источнику постоянного тока 12.

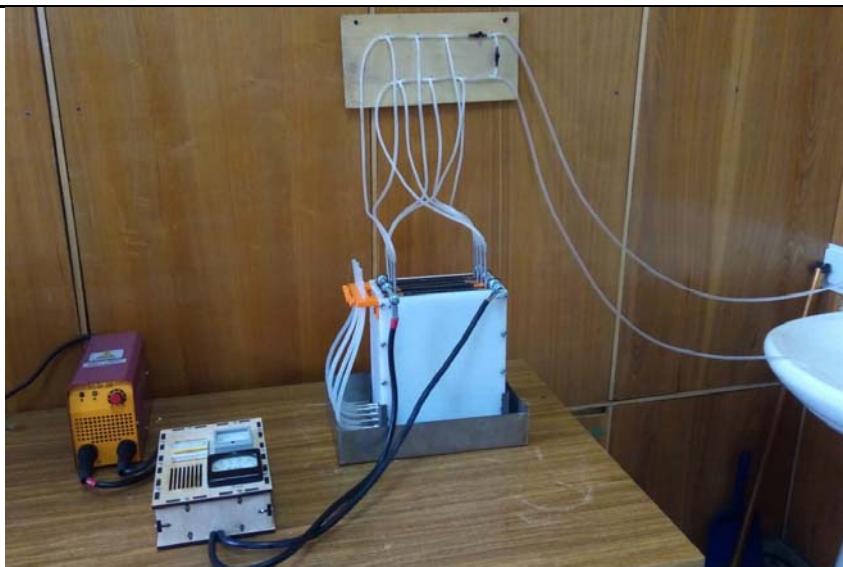


Рис. 2. Общий вид установки для исследования процесса электрохимического синтеза феррата натрия

При проведении исследований контролировались следующие технологические параметры, влияющие на процесс электросинтеза феррата натрия: концентрация электролита c , (г/л), температура электролита t , ($^{\circ}\text{C}$), величина анодной плотности тока i_A (A/m^2), продолжительность процесса электроактивационной обработки электролита T (ч).

Величина анодной плотности тока определялась по формуле

$$i = \frac{I}{S_a \cdot N_{\text{я}}}, \text{ A}/\text{m}^2, \quad (1)$$

где I – сила тока, подаваемого на электродную систему установки, А; S_a – площадь поверхности одной стороны анодного электрода, m^2 ; $N_{\text{я}} = 4$ – число электрохимических ячеек в установке.

Исследования процесса электроактивационной обработки раствора гидроксида натрия в анодных ячейках лабораторной установки проводили по следующей методике.

Приготавливался раствор гидроксида натрия в водопроводной воде заданной концентрации и нагревался до заданной температуры. Приготовленный электролит заливался в корпус лабораторного электролизера 1, и включался источник постоянного тока 12. Регулятором напряжения 13 задавалась определенная величина напряжения V (В), подаваемого в пластинчатые электроды 2 и 7, позволяющая поддерживать заданную величину анодной плотности тока i_A (A/m^2). Вентильми 8 регулировался расход воды, подаваемой в трубчатую систему охлаждения 5, позволяющую поддерживать температуру электролита на заданном уровне. Через определенные промежутки времени из анодной камеры лабораторной установки 6 отбиралась проба анализа, и определялась концентрация феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) фотометрическим способом.

Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин концентраций феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=100 \text{ A}/\text{m}^2$ представлены в виде графиков, изображенных на рис. 3.

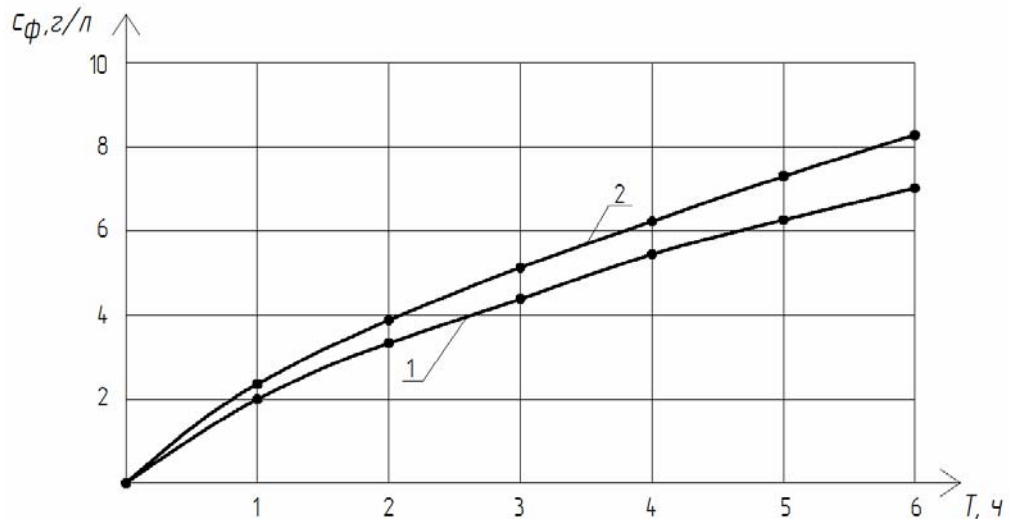


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин концентраций феррата натрия $c_{Ф}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=100 \text{ A/m}^2$:

1 – концентрация электролита 30%; 2 – концентрация электролита 40%

Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин концентраций феррата натрия $c_{Ф}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=100 \text{ A/m}^2$ представлены в виде графиков, изображенных на рис. 4.

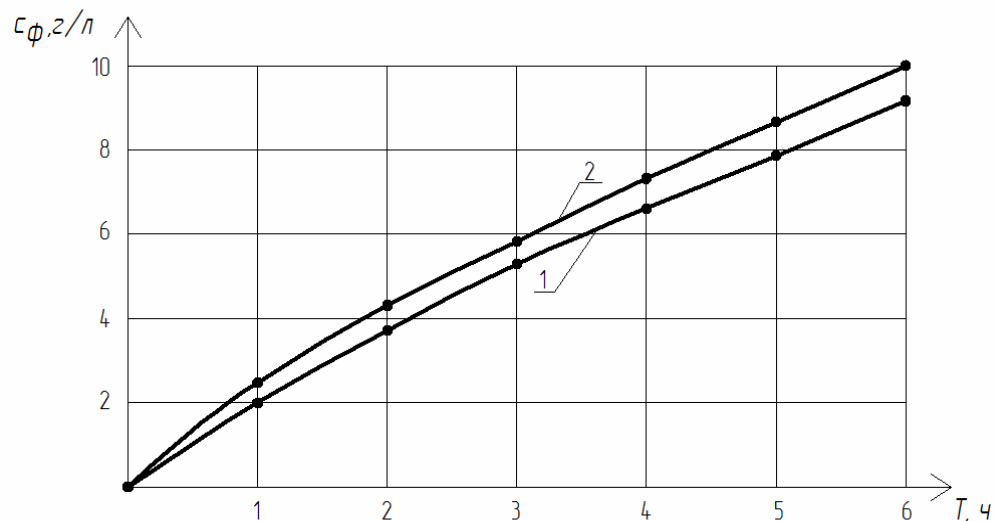


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин концентраций феррата натрия $c_{Ф}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=100 \text{ A/m}^2$:

1 – концентрация электролита 30%; 2 – концентрация электролита 40%

Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин концентраций феррата натрия $c_{Ф}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=400 \text{ A/m}^2$ представлены в виде графиков, изображенных на рис. 5.

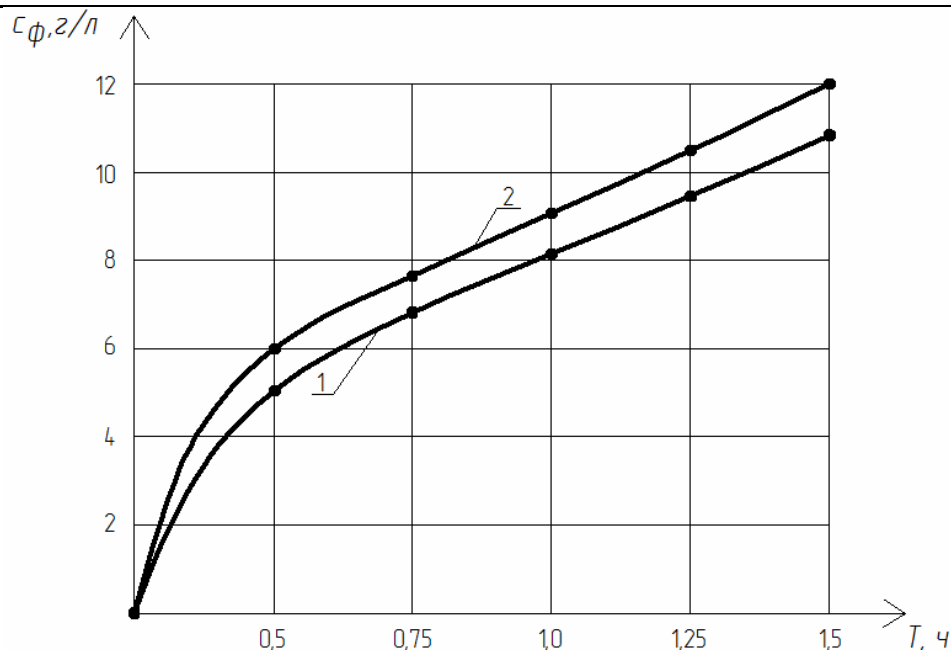


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин концентраций феррата натрия c_{ϕ} (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=400 \text{ A/m}^2$:

1 – концентрация электролита 30%; 2 – концентрация электролита 40%

Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин концентраций феррата натрия c_{ϕ} (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=400 \text{ A/m}^2$ представлены в виде графиков, изображенных на рис. 6.

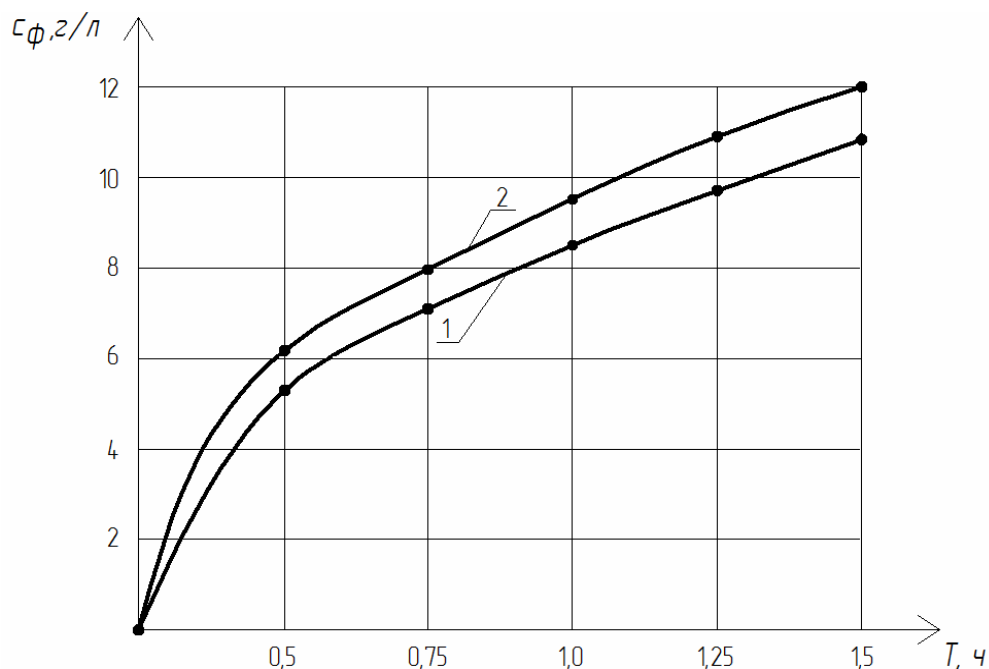


Рисунок 6. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин концентраций феррата натрия c_{ϕ} (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=400 \text{ A/m}^2$:

1 – концентрация электролита 30%; 2 – концентрация электролита 40%

Математическая обработка полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила вывести следующие математические зависимости, описывающие процесс электроактивационной обработки раствора гидроксида натрия в анодных ячейках лабораторной установки.

Математическая зависимость величины концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$, его концентрации $c_{\text{э}} = 30\%$ и плотности тока $i=100 \text{ A/m}^2$

$$c_{\text{ф}} = 2,0 \cdot T^{0,716}, \text{ г/л.} \quad (2)$$

Математическую зависимость величины концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$, его концентрации $c_{\text{э}} = 40\%$ и плотности тока $i=100 \text{ A/m}^2$

$$c_{\text{ф}} = 2,3 \cdot T^{0,716}, \text{ г/л.} \quad (3)$$

Математическую зависимость величины концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$, его концентрации $c_{\text{э}} = 30\%$ и плотности тока $i=100 \text{ A/m}^2$

$$c_{\text{ф}} = 2,2 \cdot T^{0,768}, \text{ г/л.} \quad (4)$$

Математическую зависимость величины концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$, его концентрации $c_{\text{э}} = 40\%$ и плотности тока $i=100 \text{ A/m}^2$

$$c_{\text{ф}} = 2,5 \cdot T^{0,768}, \text{ г/л.} \quad (5)$$

Математическую зависимость величины концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$, его концентрации $c_{\text{э}} = 30\%$ и плотности тока $i=400 \text{ A/m}^2$

$$c_{\text{ф}} = 8,1 \cdot T^{0,619}, \text{ г/л.} \quad (6)$$

Математическую зависимость величины концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$, его концентрации $c_{\text{э}} = 40\%$ и плотности тока $i=400 \text{ A/m}^2$

$$c_{\text{ф}} = 9,2 \cdot T^{0,619}, \text{ г/л.} \quad (7)$$

Математическую зависимость величины концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$, его концентрации $c_{\text{э}} = 30\%$ и плотности тока $i=400 \text{ A/m}^2$

$$c_{\text{ф}} = 8,4 \cdot T^{0,627}, \text{ г/л.} \quad (8)$$

Математическую зависимость величины концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (г/л) в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$, его концентрации $c_{\text{э}} = 40\%$ и плотности тока $i=400 \text{ А/м}^2$

$$c_{\text{ф}} = 9,5 \cdot T^{0,627}, \text{ г/л.} \quad (9)$$

С помощью полученных среднеарифметических значений величин концентраций феррата натрия в электролите $\overline{c_{\text{ф}}}$ (г/л) и закона Фарадея вычислялись значения величин коэффициентов выхода по току феррата натрия по формуле

$$K_{\text{в}} = \frac{c_{\text{ф}} \cdot W_{\text{э}}}{A_{\text{ф}} \cdot i \cdot S_{\text{а}} \cdot N_{\text{я}} \cdot T}, \quad (10)$$

где $W_{\text{э}}$ – объем электролита (водного раствора гидроксида натрия), заливаемого в лабораторную установку, л; $A_{\text{ф}}$ – электрохимический эквивалент феррата натрия, г/(А·ч); T – продолжительность процесса электрохимической обработки электролита, ч.

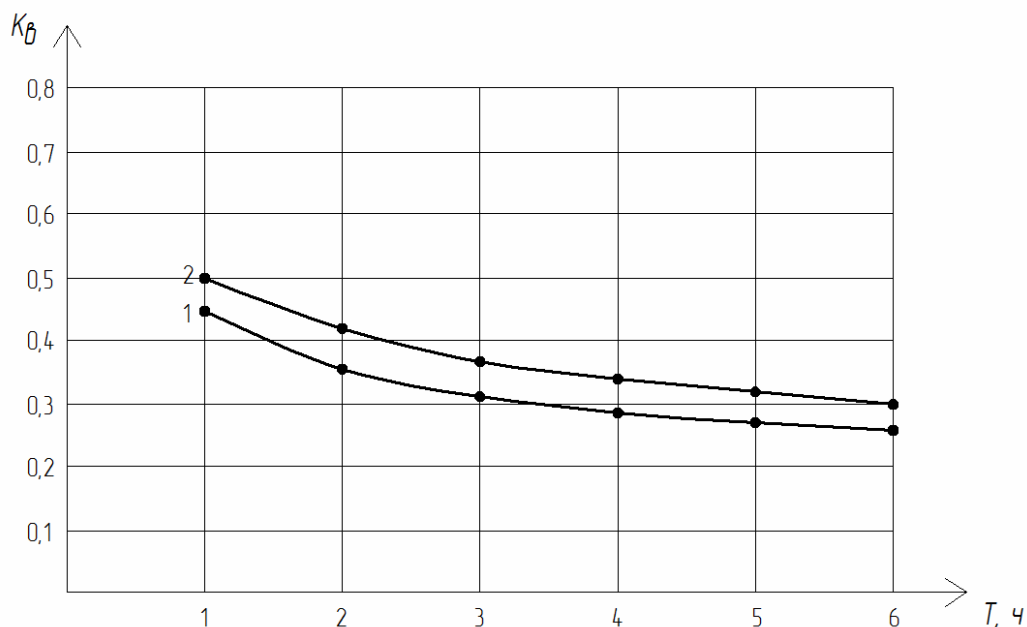


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин коэффициентов выхода по току феррата натрия $K_{\text{в}}$ в анолите лабораторной установки от продолжительности электрохимической обработки электролита T (ч) при температуре электролита $t=20^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $i=100 \text{ А/м}^2$:

1 – концентрация электролита 30%; 2 – концентрация электролита 40%

Проведенные лабораторные исследования процесса электроактивационной обработки раствора гидроксида натрия в анодных ячейках лабораторной установки позволили сделать следующие выводы:

1. При величине анодной плотности тока $i=100 \text{ А/м}^2$ и продолжительности процесса электрохимической обработки $T=6 \text{ ч}$ увеличение температуры и концентрации электролита с $t=20^{\circ}\text{C}$ и $c_{\text{э}} = 30\%$ до $t=40^{\circ}\text{C}$ и $c_{\text{э}} = 40\%$ приводит к повышению значения коэффициента выхода по току феррата натрия с $K_{\text{в}} = 0,26$ до $K_{\text{в}} = 0,36$.

2. При величине анодной плотности тока $i=400 \text{ А/м}^2$ и продолжительности процесса электрохимической обработки $T=1,5 \text{ ч}$ увеличение температуры и концентра-

ции электролита с $t=20^{\circ}\text{C}$ и $c_3 = 30\%$ до $t=40^{\circ}\text{C}$ и $c_3 = 40\%$ приводит к повышению значения коэффициента выхода по току феррата натрия с $K_b = 0,38$ до $K_b = 0,45$.

3. Электроактивационная обработка 30% и 40% водного раствора гидроксида натрия в анодных ячейках лабораторного электролизёра в течение $T=1,5$ ч при температуре электролита $t=20-40^{\circ}\text{C}$ и величине анодной плотности тока $i=100$ А/м² позволяет получить щелочной раствор с концентрацией феррата натрия $c_{\text{ф}} = 7,2 - 9,9$ г/л.

4. Электроактивационная обработка 30% и 40% водного раствора гидроксида натрия в анодных ячейках лабораторного электролизёра в течение $T=6$ ч при температуре электролита $t=20-40^{\circ}\text{C}$ и величине анодной плотности тока $i=400$ А/м² позволяет получить щелочной раствор с концентрацией феррата натрия $c_{\text{ф}} = 10,4 - 12,3$ г/л.

5. Процесс электроактивационной обработки раствора гидроксида натрия в анодных ячейках лабораторной установки рекомендуется проводить при следующих технологических параметрах: величине анодной плотности $i=400$ А/м²; концентрации электролита $c_3 = 40\%$; температуре электролита $t=40^{\circ}\text{C}$; продолжительности электроактивационной обработки $T=1,5$ ч.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Использование технологии электрохимической активации щелочных реагентов для интенсификации работы локальных очистных сооружений / С.Ю. Андреев, М.И. Яхкинд, И.А. Гарькина, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С.120–124.
2. Андреев, С.Ю. Лабораторные исследования зависимости величины удельной электропроводности электрохимической ячейки мембранного электролизера от концентрации обрабатываемого раствора гидроксида натрия и его температуры / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Князев, А.О. Кузнецова // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4. – С.161–168.

References

1. Andreev, S.Yu. Use of technology of electrochemical activation of alkaline reagents for intensification of work of local treatment facilities / S.Yu. Andreev, I.A. Yakhkind, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2015. – No. 1. – P. 120–124.
2. Andreev, S.Yu. Laboratory tests of the dependence of the electrical conductivity of the electrochemical cell of a membrane electrolyzer on the concentration of the treated sodium hydroxide solution and its temperature / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, A.A. Knyazev, A.O. Kuznetsova // Regional architecture and engineering. – 2019. – №4. – 161–168 p.

УДК 628.3

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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Ласьков Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

Князев Александр Анатольевич,
старший преподаватель кафедры
«Инженерная экология»

Долгушев Максим Сергеевич,
магистрант кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»

*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

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Building Constructions»

Knyazev Alexander Anatolyevich,
Senior Lecturer of the department
«Engineering Ecology»

Dolgushev Maksim Sergeevich,
Undergraduate of the department «Water
Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ФЕРРАТОВ В РАСТВОРАХ ГИДРОКСИДА НАТРИЯ, ПРОШЕДШИХ ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИОННУЮ ОБРАБОТКУ

С.Ю. Андреев, Н.Н. Ласьков, А.А. Князев, М.С. Долгушев

Приведены результаты экспериментальных исследований кинетики процесса разложения феррат-ионов в щелочных растворах. Показано, что кинетика процесса распада феррат-ионов в щелочных растворах может быть описана уравнением первого порядка, а величина коэффициента скорости распада $K_p^ч$ не зависит от величины начальной концентрации феррат-ионов в щелочном растворе. Получены математические зависимости, описывающие кинетику распада феррата натрия в щелочных растворах, прошедших электроактивационную обработку. Полученные математические зависимости могут быть использованы при разработке технологических процессов реагентной очистки сточных вод, предусматривающих применение щелочных растворов феррата натрия.

Ключевые слова: щелочной раствор, феррат-ион, кинетика распада, коэффициент скорости распада, термостат, люминесцент

KINETICS INVESTIGATION OF FERRATES DECOMPOSITION SODIUM HYDROXIDE SOLUTIONS AFTER ELECTROACTIVATION TREATMENT

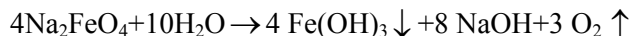
S.Yu. Andreev, N.N. Laskov, A.A. Knyazev, M.S. Dolgushev

The results of experimental studies of the kinetics of the decomposition of ferrate ions in alkaline solutions are presented. It is shown that the kinetics of the decomposition of ferrate ions in alkaline solutions can be described by a first-order equation, and the value of the decay rate coefficient does not depend on the value of the initial concentration of ferrate ions in an alkaline solution. Mathematical dependences describing the kinetics of the decomposition of sodium ferrate in alkaline solutions that have been electroactivated are obtained. The obtained mathematical dependences can be used in the development of technological processes for reagent wastewater treatment, involving the use of alkaline solutions of sodium ferrate.

Keywords: alkaline solution, ferrate ion, kinetics of decay, factor decay rate, thermostat, luminoth

Феррат натрия является одним из наиболее активных реагентов окислителей, обладающих высоким окислительным потенциалом. Окислительный потенциал феррата натрия превышает окислительный потенциал озона и имеет наивысшее значение в ряду потенциалов реагентов окислителей, используемых в процессах очистки сточных вод [1].

Высокая активность феррата натрия обуславливает нестабильность этого химического соединения, которое может существовать только в сильнощелочной среде. Со временем феррат натрия в щелочном растворе распадается с выделением гидроксида железа (ржавчина) и кислорода.



Возможность использования щелочных растворов феррата натрия в технологических процессах очистки сточных вод определяется кинетикой разложения феррат-ионов при хранении щелочного раствора.

Целью проведения данного этапа лабораторных исследований являлось определение кинетики процесса разложения феррат-ионов в растворах гидроксида натрия, прошедших электрохимическую обработку, в зависимости от концентрации раствора гидроксида натрия c_{NaOH} (г/л), концентрации содержащегося в щелочном растворе феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (мг/л) и условий хранения щелочного раствора феррата натрия.

В данном цикле лабораторных исследований контролировались основные параметры щелочного раствора феррата натрия: концентрация гидроксида натрия c_{NaOH} (г/л); концентрация феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (мг/л); температура щелочного раствора феррата натрия $t_{\text{ф}}$ (°C).

Щелочные растворы с заданной концентрацией феррата натрия приготавливались в процессе электроактивационной обработки растворов гидроксида натрия в анодных камерах лабораторной установки.

Электроактивационной обработке в лабораторной установке подвергались водные растворы гидроксида натрия, имеющие концентрацию 30% (398 г/л) и 40% (572 г/л). Исследовались щелочные растворы, содержащие концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}=5$ мг/л и $c_{\text{ф}}=10$ мг/л. Исследуемые образцы щелочных растворов заливались в пластиковые пробирки с завинчивающейся крышкой и помещались в термостат. Через заданные промежутки времени отбирались пробы щелочных растворов, и проводилось определение концентраций содержащегося в них феррата натрия. Термостатирование образцов щелочных растворов феррата натрия осуществлялось при температуре $t_{\text{T}}=20^\circ\text{C}$.

Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин остаточных концентраций феррата натрия в щелочных растворах $c_{\text{ф}}$ (мг/л) от продолжительности процесса термостатирования T_{x} (ч) при температуре $t_{\text{T}}=20^\circ\text{C}$ и начальной концентрации феррата натрия в щелочном растворе $c_{\text{ф}0} = 5$ мг / л представлены в виде графиков, изображенных на рис. 1.

Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин остаточных концентраций феррата натрия в щелочных растворах $c_{\text{ф}}$ (мг/л) от продолжительности процесса термостатирования T_{x} (ч) при температуре $t_{\text{T}}=20^\circ\text{C}$ и начальной концентрации феррата натрия в щелочном растворе $c_{\text{ф}0} = 10$ мг / л представлены в виде графиков, изображенных на рис. 2.

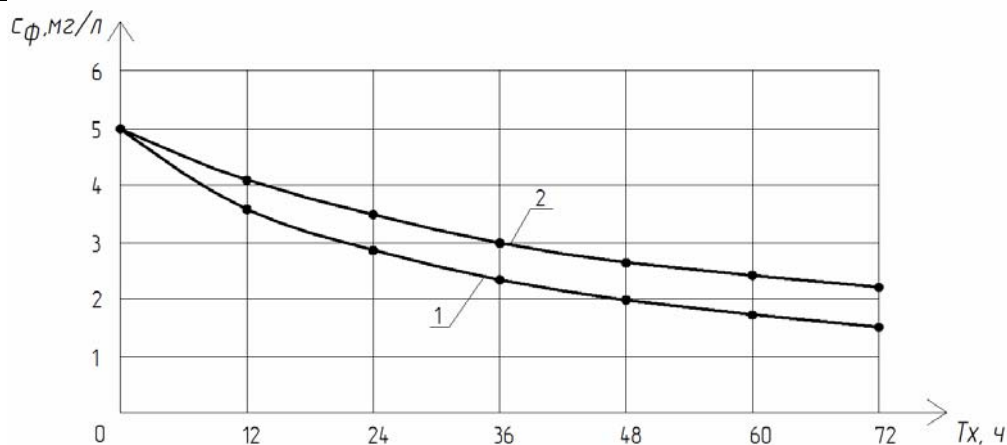


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин остаточных концентраций феррата натрия в щелочных растворах c_{ϕ} (мг/л) от продолжительности процесса термостатирования T_x (ч) при температуре $t_T=20^{\circ}\text{C}$ и начальной концентрации феррата натрия в щелочном растворе $c_{\phi 0} = 5 \text{ мг/л}$:

1 – концентрация раствора гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 30\%$;

2 – концентрация раствора гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 40\%$

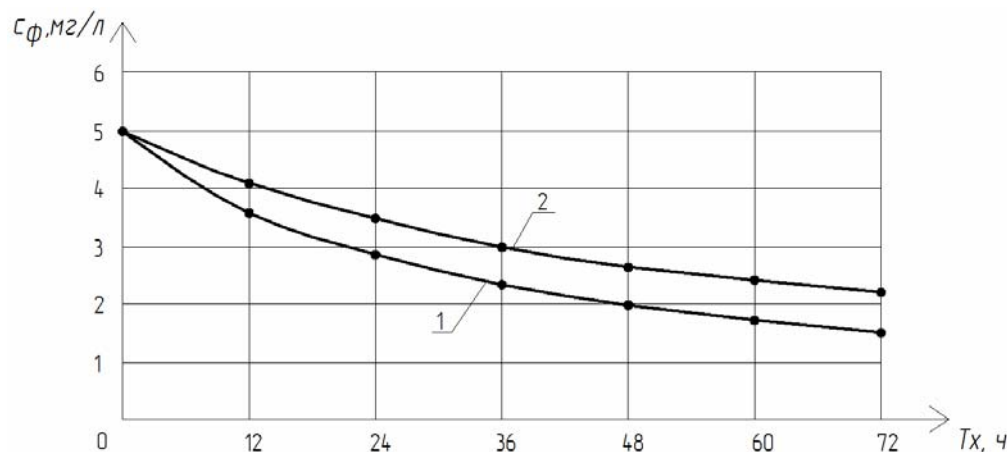


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин остаточных концентраций феррата натрия в щелочных растворах c_{ϕ} (мг/л) от продолжительности процесса термостатирования T_x (ч) при температуре $t_T=20^{\circ}\text{C}$ и начальной концентрации феррата натрия в щелочном растворе $c_{\phi 0} = 10 \text{ мг/л}$:

1 – концентрация раствора гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 30\%$;

2 – концентрация раствора гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 40\%$

Концентрация феррата натрия в щелочном растворе контролировалась фотометрическим способом по методике, представленной в работе [3].

Как свидетельствуют данные, приведенные на рис. 1 и 2, период полураспада щелочных растворов феррата натрия, хранящихся в темном месте при температуре $t_T=20^{\circ}\text{C}$, составляет $T_{\text{пр}} = 3$ сут.

С целью определения влияния освещенности на кинетику процесса разложения феррат-ионов в растворах гидроксида натрия, прошедших электрохимическую обработку, была проведена серия экспериментов, в ходе которых пластиковые пробирки с исследуемыми образцами щелочных растворов помещались в люминостат, представляющий собой лабораторный шкаф с лампой дневного света BRIGT мощностью $N=8$ Вт. Исследования проводились по методике, которая использовалась в преды-

дущей серии опытов. Температура исследуемых проб щелочных растворов в люминостате $t_T=27^\circ\text{C}$.

Общий вид люминостата с пробами исследуемых щелочных растворов феррата натрия представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид люминостата с пробами исследуемых щелочных растворов феррата натрия

Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин остаточных концентраций феррата натрия c_ϕ (мг/л) от продолжительности процесса экспонирования проб в люминостате T_x (ч) при температуре $t_T=27^\circ\text{C}$ и начальной концентрации феррата натрия в щелочном растворе $c_{\phi 1} = 5\text{ мг/л}$ представлены в виде графиков, изображенных на рис. 4.

Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин остаточных концентраций феррата натрия c_ϕ (мг/л) от продолжительности процесса экспонирования проб в люминостате T_x (ч) при температуре $t_T=27^\circ\text{C}$ и начальной концентрации феррата натрия в щелочном растворе $c_{\phi 1} = 10\text{ мг/л}$ представлены в виде графиков, изображенных на рис. 5.

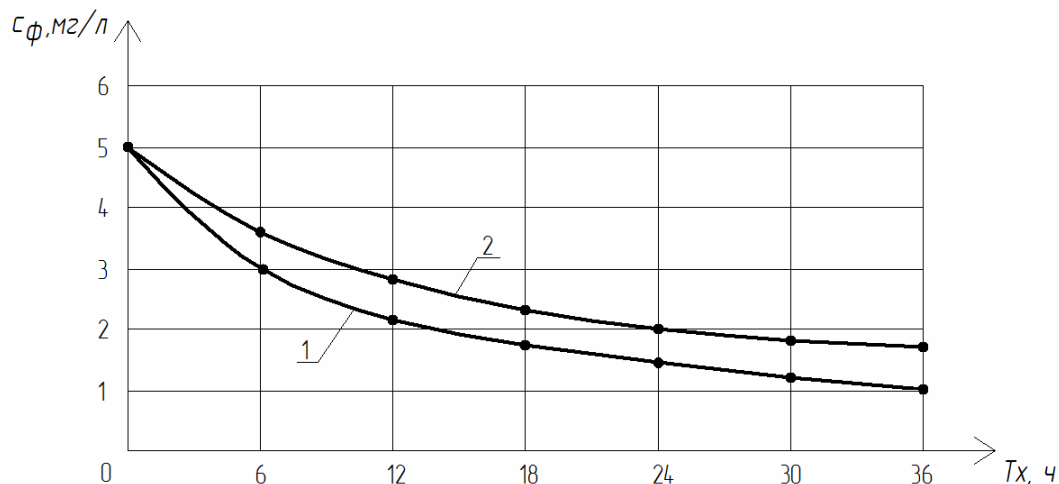


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин остаточных концентраций феррата натрия c_{ϕ} (мг/л) от продолжительности процесса экспонирования проб в люминоstate T_x (ч) при температуре $t_T=27^{\circ}\text{C}$ и начальной концентрации феррата натрия в щелочном растворе $c_{\phi} = 5$ мг/л :

1 – концентрация раствора гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 30\%$;

2 – концентрация раствора гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 40\%$

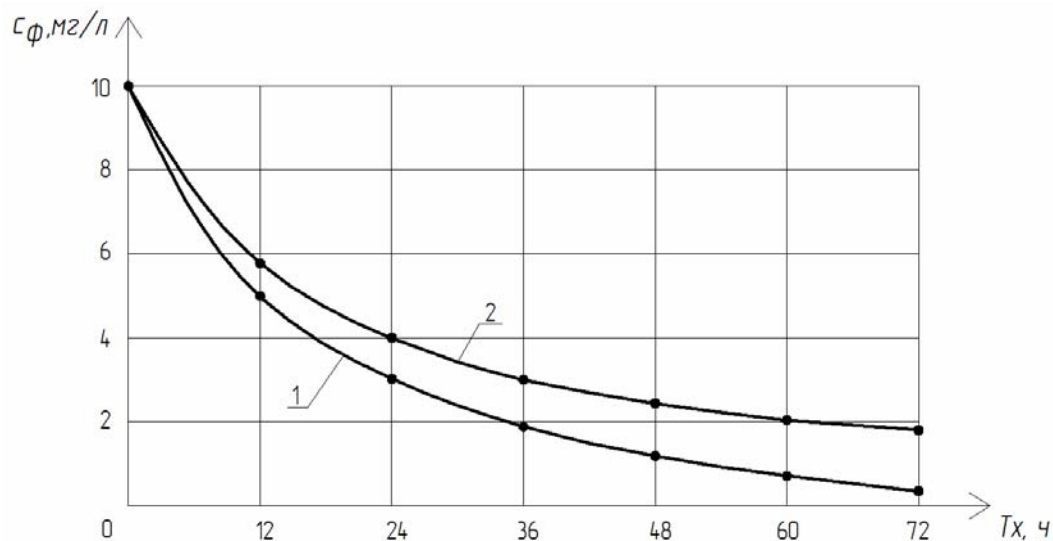


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований зависимостей величин остаточных концентраций феррата натрия c_{ϕ} (мг/л) от продолжительности процесса экспонирования проб в люминоstate T_x (ч) при температуре $t_T=27^{\circ}\text{C}$ и начальной концентрации феррата натрия в щелочном растворе $c_{\phi} = 10$ мг/л :

1 – концентрация раствора гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 30\%$;

2 – концентрация раствора гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 40\%$

Молекулы феррата натрия равномерно распределены по всему объему подвергаемых термостатированию образцов щелочных растворов, в связи с чем кинетика процесса разложения феррата натрия может быть описана уравнением скорости химической реакции, протекающей в реакторе идеального смешения:

$$\frac{dc_{\phi}}{dT_x} = k_p c_{\phi}^n = \text{const, мг/л,} \quad (1)$$

где $\frac{dc_{\phi}}{dT_x}$ – скорость распада молекул феррата натрия, мг/л; c_{ϕ} – концентрация феррата натрия в щелочном растворе в момент времени T_x , мг/л; k_p – константа скорости реакции расхода молекул феррата натрия, ч^{-1} ; n – показатель степени.

Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволила установить, что кинетика процесса распада феррата натрия может быть описана простейшей реакцией первого порядка, а показатель степени в уравнении (1) равен $n=1$.

В этом случае кинетика процесса распада феррата натрия может быть описана уравнением

$$\frac{dc_{\phi}}{dT_x} = \frac{\Delta c_{\phi}}{\Delta T_x} = \frac{c_{\phi 0} - c_{\phi}}{T_x} = k_p c_{\phi} = \text{const}, \quad (2)$$

где $c_{\phi 0}$ – концентрация феррата натрия в щелочном растворе в начальный момент времени (при $T_x = 0$), мг/л.

Из формулы (2) могут быть получены формулы

$$c_{\phi} = \frac{c_{\phi 0}}{1 + k_p T_x}, \frac{\text{мг}}{\text{л}}, \quad (3)$$

$$k_p = \frac{1}{T_x} \left(\frac{c_{\phi 0}}{c_{\phi}} - 1 \right), \text{ч}^{-1}. \quad (4)$$

Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволила определить величины констант скорости реакции распада молекул феррата натрия:

1. При концентрации щелочных растворов $c_{\text{NaOH}} = 30\%$, их температуре $t_1=20^{\circ}\text{C}$ и начальных концентрациях содержащегося в них феррата натрия $c_{\phi} = 5 \text{ мг/л}$ и $c_{\phi} = 10 \text{ мг/л}$ величина константы скорости распада феррата натрия составляет $k_p = 0,032 \text{ ч}^{-1}$.

2. При концентрации щелочных растворов $c_{\text{NaOH}} = 40\%$, их температуре $t_1=20^{\circ}\text{C}$ и начальных концентрациях содержащегося в них феррата натрия $c_{\phi} = 5 \text{ мг/л}$ и $c_{\phi} = 10 \text{ мг/л}$ величина константы скорости распада феррата натрия составляет $k_p = 0,018 \text{ ч}^{-1}$.

3. При концентрации щелочных растворов $c_{\text{NaOH}} = 30\%$, их температуре $t_1=27^{\circ}\text{C}$ и начальных концентрациях содержащегося в них феррата натрия $c_{\phi} = 5 \text{ мг/л}$ и $c_{\phi} = 10 \text{ мг/л}$ при освещении растворов лампой дневного света мощностью $N=8 \text{ Вт}$ величина константы скорости распада феррата натрия составляет $k_p = 0,102 \text{ ч}^{-1}$.

4. При концентрации щелочных растворов $c_{\text{NaOH}} = 40\%$, их температуре $t_1=27^{\circ}\text{C}$ и начальных концентрациях содержащегося в них феррата натрия $c_{\phi} = 5 \text{ мг/л}$ и $c_{\phi} = 10 \text{ мг/л}$ при освещении растворов лампой дневного света мощностью $N=8 \text{ Вт}$ величина константы скорости распада феррата натрия составляет $k_p = 0,063 \text{ ч}^{-1}$.

Проведенные лабораторные исследования кинетики процесса разложения феррат-ионов в растворах гидроксида натрия, прошедших электроактивационную обработку, позволили сделать следующие выводы:

1. При постоянной величине концентрации гидроксида натрия в щелочном растворе $c_{\text{NaOH}} = \text{const}$ и его температуре $t_1 = \text{const}$ величина коэффициента

скорости реакции распада молекул феррата натрия k_p имеет постоянное значение и не зависит от величины начальной концентрации феррата натрия $c_{\text{ф}}$ (мг/л) в щелочном растворе (коэффициент скорости реакции распада молекул феррата натрия является константой $k_p = \text{const}$).

2. Повышение концентрации гидроксида натрия в щелочном растворе, прошедшем электроактивационную обработку, с $c_{\text{NaOH}} = 30\%$ до $c_{\text{NaOH}} = 40\%$ приводит к росту стабильности щелочного раствора феррата натрия и уменьшению значения константы скорости реакции распада молекул феррата натрия с $k_p = 0,032 - 0,954 \text{ ч}^{-1}$ до $k_p = 0,018 - 0,719 \text{ ч}^{-1}$.

3. Освещение образцов щелочных растворов феррата натрия лампой дневного света мощностью $N=8$ Вт приводит к понижению их стабильности.

4. В технологических процессах очистки производственных сточных вод рекомендуется использовать щелочной раствор с концентрацией гидроксида натрия $c_{\text{NaOH}} = 40\%$ (572 г/л) и начальной концентрацией феррата натрия $c_{\text{ф0}} = 10 \text{ г/л}$, хранящийся в темном месте не более 24 часов при температуре $t_{\text{T}}=20^\circ\text{C}$ и имеющий концентрацию феррата натрия в конце периода хранения $c_{\text{ф}}=7,0 \text{ г/л}$.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Интенсификация деструктивной очистки производственных сточных вод с использованием окислителя на основе феррата натрия / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, Н.Н. Ласьков // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С.152–157.

2. Андреев, С.Ю. Анализ концентрации феррата натрия в растворе гидроксида натрия после активационной обработки в электролизе / С.Ю. Андреев, Н.Н. Ласьков, М.И. Яхкинд, А.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №4. – С.159–165.

References

1. Andreev, S.Yu. Intensification of destructive treatment of industrial wastewater using an oxidizer based on sodium ferrate / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, N.N. Laskov // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 2. – P. 152–157.

2. Andreev, S.Yu. Analysis of the concentration of sodium ferrate in a solution of sodium hydroxide after activation treatment in electrolysis / S.Yu. Andreev, N.N. Laskov, M.I. Yakhkind, A. A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2018. – No.4. – P. 159–165.

УДК 666.971.022.7: 534-143

*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**Вилкова Наталья Георгиевна,**
доктор химических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail: ngvilkova@mail.ru**Мазурин Николай Николаевич,**
аспирант кафедры «Физика и химия»
E-mail: kol29111992@yandex.ru*Пензенский государственный университет*Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, д.40,
тел. (8412) 368209; факс (8412) 368400**Мишина Светлана Ивановна,**
кандидат химических наук, доцент
кафедры «Химия и теория и методика
обучения химии»
E-mail: elancv@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**Vilkova Natalya Georgievna,**
Doctor of Chemical Sciences, Professor of the
department «Physics and Chemistry»
E-mail: ngvilkova@mail.ru**Mazurin Nikolay Nikolaevich,**
Postgraduate student of the department
«Physics and Chemistry»
E-mail: kol29111992@yandex.ru*Penza State University*Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel. (8412) 368209; fax (8412) 368400**Mishina Svetlana Ivanovna,**
Candidate of Chemical Sciences, Associate
Professor of the department «Chemistry and
Theory and Methodology of Teaching
Chemistry»
E-mail: elancv@mail.ru

ПЕНООБРАЗОВАНИЕ В СТОЧНЫХ ВОДАХ: ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ПЕН И МЕТОД ИХ УСКОРЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, Н.Н. Мазурин

Одним из основных физико-химических свойств ПАВ является высокая пенообразующая способность, причём в сравнительно низких концентрациях (0,1-0,5 мг/дм³). Предельно допустимая концентрация (ПДК) ПАВ в воде водоёмов составляет 0,1-0,5 мг/дм³. При этом лимитирующим показателем вредности указанных веществ является их пенообразующая способность. Большая сложность очистки сточных вод от ПАВ различной природы состоит в том, что данные вещества проявляют индивидуальные свойства при взаимодействии с водой, растворёнными веществами и частицами твёрдой фазы. Изучены устойчивость пен, стабилизированных ПАВ различной химической природы, и особенности их разрушения при достижении критического давления в каналах Плато пены. Показано, что быстрое разрушение пен, стабилизированных неионогенными ПАВ, может быть вызвано: градиентом поверхностного натяжения по длине канала вследствие ускоренного вытекания жидкости из пены под действием приложенного перепада давления; невозможностью быстрой структурной перестройки каналов, узлов и плёнок при больших градиентах натяжения; быстрым разрушением пенных плёнок в зоне максимального давления (вблизи пористой перегородки). Пены, стабилизированные ионогенным ПАВ, могут сохранять устойчивость при достижении максимального капиллярного давления в каналах Плато-Гиббса пены, а причиной их разрушения является диффузионное укрупнение газовых пузырьков до критических размеров. Ускоренное разрушение пен, стабилизированных неионогенными ПАВ, в устройствах, содержащих пористые перегородки, может быть использовано для эффективного их разрушения при нежелательном пенообразовании.

Ключевые слова: пена, сточные воды, пенообразование, капиллярное давление, ускоренное разрушение

FOAMING IN WASTERWATER: FORMATION OF STABLE FOAMS AND METHOD FOR THEIR ACCELERATED DESTRUCTION

N.G. Vilkova, S.I. Mishina, N.N. Mazurin

One of the main physicochemical properties of surfactants is a high foaming ability in relatively low concentrations (0.1-0.5 mg / dm³). The maximum permissible concentration (MPC) of surfactants in waters of reservoirs is 0.1-0.5 mg / dm³. Moreover, the limiting indicator of the harmfulness of these substances is their foaming ability. The great difficulty in treating wastewater from surfactants of various nature is that these substances exhibit individual properties when interacting with water, dissolved substances and solid particles. The paper studies the stability of foams stabilized by surfactants of various chemical nature and the features of their destruction upon reaching critical pressure in the foam Plateau channels. It is shown that the rapid destruction of foams stabilized by nonionic surfactants can be caused by: a gradient of surface tension along the length of the channel due to the accelerated leakage of liquid from the foam under the action of a pressure drop; the impossibility of rapid structural adjustment of channels, nodes and films with large tension gradients; the rapid destruction of foam films in the zone of maximum pressure (near the porous septum). Foams stabilized by ionic surfactants can remain stable when the maximum capillary pressure is reached in the Plateau-Gibbs channels of the foam, and the cause of their destruction is the diffusion enlargement of gas bubbles to critical sizes. The accelerated destruction of foams stabilized by nonionic surfactants in devices containing porous partitions can be used to effectively destroy them in case of undesirable foaming.

Keywords: foam, wastewater, foaming, capillary pressure, accelerated destruction

Известно, что поверхностно-активные вещества (ПАВ) являются группой соединений, которые активно применяют в различных отраслях современного производства. Области использования ПАВ хорошо известны и включают применение в качестве активных компонентов в моющих и чистящих средствах; в косметике: в шампунях, в зубной пасте, лосьонах, тониках и других продуктах; в текстильной промышленности – для снятия статического электричества на волокнах синтетической ткани; в кожевенной – для защиты кожаных изделий от легких повреждений и слипания и т.д. Одним из основных физико-химических свойств ПАВ является высокая пенообразующая способность, причём в сравнительно низких концентрациях (0,1-0,5 мг/дм³). Некоторые нерастворимые ПАВ на поверхности воды образуют нерастворимые пленки, распространяющиеся при достаточной площади растекания в монослои. Попадая в водоёмы, ПАВ активно участвуют в процессах перераспределения и трансформации других загрязняющих веществ (хлорофоса, анилина, тяжелых металлов, канцерогенных веществ, нефтепродуктов), активизируя их токсическое действие. Незначительной концентрации ПАВ (0,05-0,10 мг/дм³) в воде достаточно, чтобы активизировать токсичные вещества.

Многими исследователями отмечается зависимость степени и характера влияния ПАВ на водные системы от химической структуры веществ. Отрицательное влияние оказывают алкиларилсульфонаты, т.е. вещества, имеющие в своей молекуле бензольное кольцо, и некоторые неионогенные вещества. Менее всего токсичны ПАВ на основе полимеров, несколько токсичнее алкилсульфаты и алкилсульфонаты. Соединения, имеющие прямую боковую цепь, более токсичны, чем вещества с сильно разветвлённой углеродной цепью. Предельно допустимая концентрация (ПДК) ПАВ в воде водоёмов составляет 0,1-0,5 мг/дм³. Отметим, что лимитирующим показателем вредности поверхностно-активных веществ является их пенообразующая способность, которая оказывается весьма существенной при повторном использовании очищенных сточных вод в техническом водоснабжении промышленных предприятий. Большая сложность очистки сточных вод от ПАВ различной природы состоит в том, что данные вещества проявляют индивидуальные свойства при взаимодействии с водой, растворенными веществами и частицами твердой фазы.

Процесс пенообразования в сточных и природных водах будет определяться химической природой веществ, а также их взаимодействием с диспергированными частицами твердой фазы. Исследованию устойчивости пен, формирующихся в системе твердая частица – ПАВ, посвящены проводимые в последнее время исследования [1-5].

В работе [1] показано, что твердые частицы карбоната кальция, сульфата бария и сульфата стронция улучшают термодинамическую стабильность пены. Это связано с распределением полугидрофильных твердых частиц, которые образуют моно- и многослойные цепочки на границах пенной пленки и канала Плато. С другой стороны, твердые частицы оксида железа и сульфата кальция могут дестабилизировать пену в результате их гидратации и быстрого оседания по причине высокой плотности. В работе [2] измерением модуля упругости при сжатии показано, что поверхностно-активные вещества необходимы, чтобы обеспечить адсорбцию частиц на границе раздела вода – газ, но они не влияют на свойства поверхности после того, как частицы адсорбируются. Свойства пен, которые могут сохраняться целыми неделями при комнатной температуре, но могут быстро разрушаться с использованием магнитного поля, рассмотрены в [3]. Эти пены стабилизированы частицами фталата гипромеллозы (HP-55) и содержат покрытые олеиновой кислотой частицы карбонильного железа, встроенные в матрицу HP-55. Изучалось влияние органических жидкостей на устойчивость пен, содержащих различные поверхностно-активные вещества [4-6]. В работе [6] показано, что дестабилизирующее действие масла на пену было более выраженным для алканов с короткой углеродной цепью, причем стабильность пены и объем жидкости в данной дисперсной системе увеличиваются с концентрацией поверхностно-активного вещества.

Проведенный анализ показывает, что формирование устойчивых пен, как и возможность их ускоренного разрушения в результате физико-химических воздействий, представляет собой актуальную задачу.

Цель работы – анализ устойчивости пен, стабилизированных ПАВ различной химической природы, и метода их ускоренного разрушения.

Материалы и методы исследования

Использовали следующие ПАВ: децилсульфат натрия (DSNa) квалификации «чистый»; Тритон X-100 фирмы «Ferrick»; кремнийорганические соединения КС-1, БС-3, КЭП-2.

Пены получали пропусканием сжатого воздуха в раствор пенообразователя.

При изучении ускоренного разрушения пен под действием приложенных перепадов давления использовали ячейки с фильтрами различной пористости (ПОР-40, ПОР16), к которым прикладывали пониженный перепад давления; капиллярное давление измеряли капиллярным микроманометром.

Результаты и обсуждение

Известно, что время жизни пены может значительно уменьшаться при увеличении перепада давлений, приложенного к ее жидкой фазе ΔP , и, соответственно, при увеличении расклинивающего давления в пенных пленках. Свойства пен при изменении капиллярного давления в каналах Плато рассматривались впервые в работах П.М.Круглякова, Д.Ексеровой (70-е годы прошлого века).

Причем при определенном перепаде давления, названном критическим ($\Delta P_{кр}$), разрушение пенного слоя может происходить лавинообразно в течение нескольких секунд. В этом случае ускоренное вытекание жидкости по каналам Плато-Гиббса пены приводит к формированию высокократных «сухих» пен с объемной долей жидкости $f = 0,001$. Зависимость времени жизни таких дисперсных систем (τ) от перепада давления особенно заметна в пенах, стабилизированных неионогенными ПАВ. В частности, установлено, что в пене из раствора 20-оксиэтилированного нонилфенола ($5 \cdot 10^{-4}$ моль/л NP-20+ 0,15 моль/л NaCl) время жизни составляет ≈ 30 мин при $\Delta P = 20$ кПа и уменьшается до 3 мин при $\Delta P = 27-30$ кПа. В грубодисперсной пене ($a_{исх} = 0,3$ см) из раствора 10^{-3} моль/л DDSNa + 0,4 моль/л NaCl τ также уменьшается до 4 мин при увеличении ΔP до 7 кПа. Природа ускоренного разрушения под действием критического давления до сих пор не совсем очевидна.

Исследование влияния больших перепадов давления $\Delta P \gg \rho g H$ (включая область критических перепадов $\Delta P_{кр}$) на кинетику разрушения столба пены, время жизни и кинетику установления капиллярного давления P_{σ} в зависимости от различной дисперсности, высоты столба, типа пенных пленок и пенообразователя с целью выяснения характера разрушения пен из различных пенообразователей (ионогенного ПАВ – додецилсульфата натрия DDSNa, неионогенного ПАВ – Тритона X-100) было проведено нами ранее [7-9]. В частности, показано что общее время жизни пены τ_0 из раствора Тритона X-100 $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л + 0,4 моль/л NaCl складывается из индукционного периода (τ_i), в течение которого капиллярное давление (P_{σ}) растет, а высота столба пены остается практически постоянной, и собственно времени разрушения столба пены τ . С увеличением ΔP период разрушения уменьшается, так что при больших ΔP общее время жизни пены становится равным τ_i . Для пены из раствора Тритона X-100 $\tau_i = \tau = 3$ мин при $\Delta P = 10$ кПа и комнатной температуре. Такая закономерность разрушения наблюдается в пенах из раствора Тритона X-100 и при других высотах столба и дисперсностях.

Увеличение перепада давления в пенах из раствора ионогенного ПАВ – додецилсульфата натрия – также приводило к уменьшению τ , однако общее время жизни даже при больших ΔP ($\Delta P = 20$ кПа) составляло около 60 мин.

Исследование зависимости $\tau(\Delta P)$ для пены из раствора Тритон X-100 + 0,4 моль/л NaCl с различной высотой столба при комнатной температуре показало, что время жизни пены составляет 35 мин, 23 мин, 9 мин при высоте слоя соответственно 5 см, 3 см и 1 см, что, очевидно, связано с различным временем установления максимального $P_{\sigma_{max}}$ равновесного капиллярного давления. При перепадах давлений более 8 кПа времена жизни заметно сближаются.

Было установлено, что при перепаде давления (более 10 кПа для пены из раствора Тритона X-100 + 0,4 моль/л NaCl и более 4 кПа, 2 кПа, 5 кПа для пен, стабилизированных кремнийорганическими соединениями КС-1, БС-3 и КЭП-2, рис. 1, зависимости 1- 2) время жизни слоя пены не зависит от величины приложенного перепада давления, а столб пены начинает разрушаться лавинообразно в течение нескольких секунд после установления в пене некоторого капиллярного давления P_{σ} .

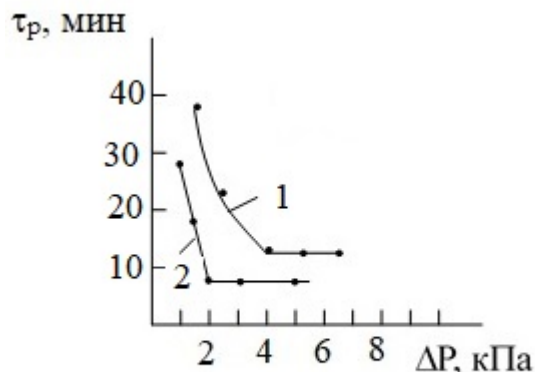


Рис .1. Зависимость $\tau_p(\Delta P)$ для пен из растворов кремнийорганических соединений:
1 – КС-1, $T=298$ К; 2 – БС-3, $T=298$ К

Измерения избыточного капиллярного давления в пене из раствора Тритона X-100 (с различной высотой пенного слоя) проводили на расстоянии 0,1-0,5 см от пористого фильтра. Установлено, что при перепаде давления $\Delta P \leq 7$ кПа в пене устанавливается равновесное капиллярное давление, соответствующее приложенным перепадам. При увеличении ΔP до 10 и 20 кПа максимальное капиллярное давление не достигало указанных значений и составляло 70% и 14% от приложенного.

Уменьшение τ при увеличении приложенных перепадов давления наблюдали и в пенах различной степени дисперсности (рис. 2). Однако при постоянном давлении грубодисперсные пены, полученные на генераторе РО-2, разрушались быстрее, что связано, вероятно, с ускоренным разрушением пенных пленок большей площади.

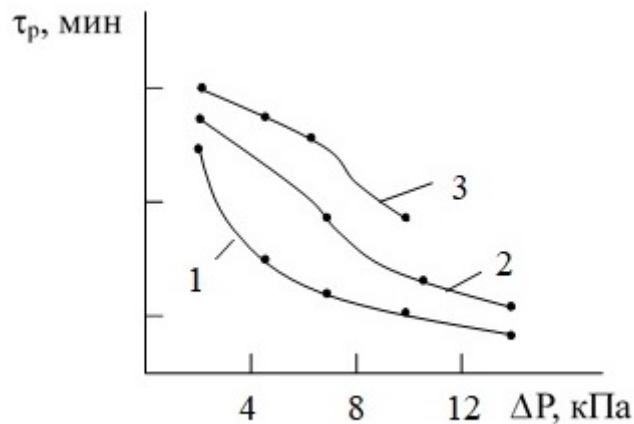


Рис. 2. Зависимость $\tau_p(\Delta P)$ для пен из раствора Тритона X-100 + 0,4 моль/дм³ NaCl ($H=1$ см) для пен с разной дисперсностью:
1 – генератор РО-2; 2 – генератор РО-3; 3 – генератор РО-4

Известно, что пленки из растворов ПАВ обладают способностью «сопротивляться» изменению толщины. Способность пленок увеличивать свое натяжение при растяжении называется упругостью. Известно, что при медленных деформациях поверхностей и высоких концентрациях ПАВ поведение пленок подобно поведению пленок из одного растворителя: изменение поверхностного натяжения мгновенно восстанавливается вследствие диффузии ПАВ из объемной фазы. При этом свойство упругости пленки (равновесной и динамической) состоит в том, что в ответ на внешнее воздействие (локальное растяжение или сжатие) возникает противодействующая сила, которая после снятия возмущения возвращает пленку в исходное состояние (то есть после растяжения пленка вновь утолщается). Вероятно, быстрая деформация, например ускоренное вытекание жидкости из пены, и возникающий градиент поверхностного натяжения по длине канала могут служить причиной быстрого разрыва пленки и разрушения пены в целом. Отметим, что в отдельных опытах методом хроматографического анализа была показана возможность концентрирования додецилсульфата натрия в нижних слоях пены при течении раствора по каналам Плато-Гиббса, что подтверждает причину и возможность возникновения градиента поверхностного натяжения по длине канала Плато.

Как отмечалось, измерения избыточного капиллярного давления в пене из раствора Тритона X-100 (с различной высотой пенного слоя) проводили на расстоянии 0,5-0,1 см от фильтра. При этом разрушение пен из неионогенного ПАВ – Тритона X-100 – и кремнийорганических соединений при установлении критического давления всегда инициировалось интенсивным разрушением пленок вблизи пористой перегородки, т.е. в области максимального P_{σ} . При этом разрушение отдельных элементов пенной структуры являлось причиной ускоренного разрушения столба в целом.

Иной характер разрушения наблюдали в пенах, стабилизированных ионогенными ПАВ. Например, время жизни пены из раствора ионогенного ПАВ – децилсульфата натрия (DSNa) ($7 \cdot 10^{-3}$ моль/л DSNa + 0,1 моль/л NaCl) – было достаточно велико даже при больших перепадах давления и составляло 60 и 108 мин при $\Delta P=20$ и 10 кПа соответственно, как отмечалось ранее. На рис. 3 представлена кинетика установления капиллярного давления в пене из раствора $7 \cdot 10^{-3}$ моль/л DSNa + 0,1 моль/л NaCl. Как видно из рисунка, капиллярное давление достигает максимального значения 6 кПа за 10 мин и далее практически не меняется до полного разрушения пенного слоя (плато

на кривой $P_c(\tau)$). Уменьшение высоты пены происходило в результате ее постепенного (последовательного) разрушения, которое наблюдали при неизменном капиллярном давлении в каналах Плато, и было обусловлено достижением «критического» размера пузырьков, при котором наблюдали полное разрушение пенного слоя.

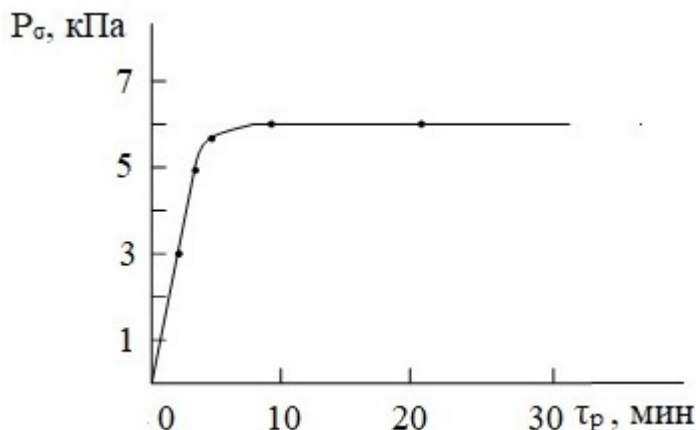


Рис. 3. Кинетика установления капиллярного давления в пене из раствора $7 \cdot 10^{-3}$ моль/л DSNa + 0,1 моль/л NaCl, $\Delta P=20$ кПа, $T=297$ К (микроманометр расположен на расстоянии 0,5 см от фильтра)

Таким образом, при исследовании устойчивости пен под действием больших перепадов давления установлено, что пены из растворов Тритона X-100 и кремнийорганических соединений при некотором критическом давлении могут лавинообразно разрушаться в течение 1-2 секунд. Ускоренное разрушение таких пен может быть вызвано:

- градиентом поверхностного натяжения по длине канала вследствие ускоренного вытекания жидкости из пены под действием приложенного перепада давления;
- невозможностью быстрой структурной перестройки каналов, узлов и пленок при больших градиентах натяжения;
- быстрым разрушением пенных пленок в зоне максимального давления (вблизи пористой перегородки);
- пены, стабилизированные ионогенным ПАВ, могут сохранять устойчивость при достижении максимального капиллярного давления в каналах Плато-Гиббса пены, а причиной их разрушения является диффузионное укрупнение газовых пузырьков до критических размеров.

Ускоренное разрушение пен, стабилизированных неионогенными ПАВ, при контакте с пористыми перегородками может быть использовано для эффективного их разрушения при нежелательном пенообразовании в сточных водах различных производств.

Список литературы

1. Rafati, R. Experimental study on stability and rheological properties of aqueous foam in the presence of reservoir natural solid particle / R. Rafati, A. Sh.Haddad, H. Hamidi // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2016. – Vol. 509, № 20. – P.19–31.
2. Maestro, A. Foams stabilised by mixtures of nanoparticles and oppositely charged surfactants: relationship between bubble shrinkage and foam coarsening / A. Maestro, E. Rio, W. Drenckhan, D. Langevin and A. Salonen // *Soft Matter*. – 2014. – Vol. 10. – P. 6975–6983.
3. Lam, S. Stability and Viscoelasticity of Magneto-Pickering Foams / S. Lam, E. Blanco, S.K. Smoukov, K.P. Velikov, S.A. Khan and O.D. Velev // *Langmuir*. – 2013. – Vol. 29. – P. 10019–10027.

4. Vilkova, N.G. Properties and stability of foams containing diesel fuel / N.G.Vilkova, Y.A.Gritzova // Slovak international scientific journal. – 2017. – №6, N 1. – P.16–20.
5. Вилкова, Н.Г. Очистка воды от дизельного топлива/ Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, О.В. Дорчина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №12. – С. 42–46.
6. Simjoo, M. Foam stability in the presence of oil: Effect of surfactant concentration and oil type / M. Simjoo, T. Rezaei, A. Andrianov, P.L.J. Zitha // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2013. – Vol. 438. – P. 148–158.
7. Vilkova, N.G. Behavior of emulsion in a centrifugal field: kinetics of increase in the excess pressure and destruction of emulsion / N.G. Vilkova, P.M. Kruglyakov // Colloid Journal. – 2001. – Vol. 63, N 6. – P. 675–679.
8. Vilkova, N.G. Influence of a liquid flow through a foam under a pressure drop on the Plateau border curvature profile / N.G. Vilkova, P.M. Kruglyakov // Mendeleev commun. – 2004. – N1. – P.22–29.
9. Vilkova, N.G. Investigation of the foam and emulsion destruction under the great pressure gradients / N.G. Vilkova, P.M. Kruglyakov // Advances in colloid and interface science. – 2004. – Vol. 108-109 – P.159–165 p.

References

1. Rafati, R. Experimental study on stability and rheological properties of aqueous foam in the presence of reservoir natural solid particle / R. Rafati, A. Sh.Haddad, H. Hamidi // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2016. – Vol. 509, № 20. – P.19–31.
2. Maestro, A. Foams stabilised by mixtures of nanoparticles and oppositely charged surfactants: relationship between bubble shrinkage and foam coarsening / A. Maestro, E. Rio, W. Drenckhan, D. Langevin and A. Salonen // Soft Matter. – 2014. – Vol. 10. – P. 6975–6983.
3. Lam, S. Stability and Viscoelasticity of Magneto-Pickering Foams / S. Lam, E. Blanco, S.K. Smoukov, K.P. Velikov, S.A. Khan and O.D. Velev // Langmuir. – 2013. – Vol. 29. – P. 10019–10027.
4. Vilkova, N.G. Properties and stability of foams containing diesel fuel / N.G.Vilkova, Y.A.Gritzova // Slovak international scientific journal. – 2017. – №6, N 1. – P.16–20.
5. Vilkova, N.G. Water purification from diesel fuel / N.G. Vilkova, S.I. Mishina, O.V. Dorchina // International Research Journal. – 2016. – N 12. – P. 42–46.
6. Simjoo, M. Foam stability in the presence of oil: Effect of surfactant concentration and oil type / M. Simjoo, T. Rezaei, A. Andrianov, P.L.J. Zitha // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2013. – Vol. 438. – P. 148–158.
7. Vilkova, N.G. Behavior of emulsion in a centrifugal field: kinetics of increase in the excess pressure and destruction of emulsion / N.G. Vilkova, P.M. Kruglyakov // Colloid Journal. – 2001. – Vol. 63, N 6. – P. 675–679.
8. Vilkova, N.G. Influence of a liquid flow through a foam under a pressure drop on the Plateau border curvature profile / N.G. Vilkova, P.M. Kruglyakov // Mendeleev commun. – 2004. – N1. – P.22–29.
9. Vilkova, N.G. Investigation of the foam and emulsion destruction under the great pressure gradients / N.G. Vilkova, P.M. Kruglyakov // Advances in colloid and interface science. – 2004. – Vol. 108-109 – P.159–165 p.

УДК 621.6.036

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 51-50-18

Усачев Александр Прокофьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение,
вентиляция, водообеспечение и прикладная
гидрогазодинамика»

E-mail: usachev-ap@mail.ru

АО "Гипрониигаз".

Россия, 410012, г. Саратов,
проспект им. Кирова С.М., д. 54,
тел.: (845-2) 74-94-95

Шурайц Александр Лазаревич,
доктор технических наук, генеральный
директор АО «Гипрониигаз»

E-mail: Shuraits@niigaz.ru

Бирюков Александр Валерьевич,
кандидат технических наук, директор
научно-исследовательского центра
АО «Гипрониигаз»

E-mail: Biryukov@niigaz.ru

ООО «Новапром»

Россия, Россия, г. Саратов,
тел. (8452) 98-70-05

Усуев Заур Мухтарович,
директор

E-mail: usuev_zaur@mail.ru

*Saratov State Technical University named
after Gagarin Yu.A.*

Russia, 410054, Saratov,
77, Politechnicheskaya St.,
tel.: (8452) 51-50-18

Usachev Alexander Prokofievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and Applied
Hydrogasodynamics»

E-mail: usachev-ap@mail.ru

Giproniigas PLC

Russia, 410012, Saratov,
54, Kirov Avenue,
tel.: (845-2) 74-94-95

Shurayts Alexander Lazarevich,
Doctor of Sciences, General Director of
Giproniigas PLC

E-mail: Shuraits@niigaz.ru

Biryukov Alexander Valeryevich,
Candidate of Sciences, Director of the
research center of Giproniigas PLC

E-mail: Biryukov@niigaz.ru

Novaprom LLC

Russia, Saratov,
tel. (8452) 98-70-05

Ushev Zaur Mukhtarovich,
Director

E-mail: usuev_zaur@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ КОРРОЗИИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ КОРПУСОМ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ УСТАНОВКИ ОЧИСТКИ И БЫСТРОСЪЕМНОЙ КРЫШКОЙ

А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирюков, З.М. Усуев

Разработаны методические положения по предотвращению коррозии в кольцевом зазоре между стальным корпусом двухступенчатой установки очистки и быстросъемной крышкой, заполненном инертным газом. Определены значения температуры и влажности, при которых отсутствует конденсация водяных паров в инертном газе и исключается коррозия стальных поверхностей.

Ключевые слова: методические положения, предотвращение, коррозия, кольцевой зазор, стальной корпус, двухступенчатая установка, очистка, быстросъемная крышка, инертный газ, водяные пары, кислород

CORROSION PREVENTION TECHNIQUE IN THE GAP BETWEEN A TWO-STAGE CLEANING UNIT AND A QUICK-RELEASE COVER

A.P. Usachev, A.L. Shuraits, A.V. Biryukov, Z.M. Usuev

The article is devoted to the development of methodological provisions for preventing corrosion in the annular gap between the steel body of a two-stage cleaning unit and a quick-release cover filled with an inert gas. The paper defines the values of temperature and humidity at which there is no condensation of water vapor in an inert gas and corrosion of steel surfaces is excluded.

Keywords: methodological provisions, prevention, corrosion, ring gap, steel body, two-stage unit, cleaning, quick-release cover, inert gas, water vapor, oxygen

Обеспечение эффективной и надежной эксплуатации современного высокоточного газорегуляторного оборудования высокой пропускной способности до 100,0 тыс. м³/ч требует использования двухступенчатых установок (ДУ), содержащих цилиндрические фильтрующие картриджи (ЦФК) грубой и тонкой очистки газа.

Однако значительными недостатками существующих газовых ДУ большой пропускной способности являются высокие временные и эксплуатационные затраты на демонтаж съемных крышек, имеющих большое количество болтовых соединений на основе резьбовых шпилек, гаек и пружинных фиксирующих шайб, а также недолговечные плоские уплотнительные прокладки, фиксируемые на поверхности соединительного выступа фланца клеевым составом. Демонтаж крышек ДУ осуществляется для удаления из цилиндрических фильтрующих картриджей механических загрязнений, осевших на них в процессе очистки газа.

Существующие съемные крышки ДУ, эксплуатирующиеся при наличии в природном газе повышенного содержания крупных и мелких механических примесей, требуют высокой частоты их демонтажа. Уплотнительные прокладки при этом быстро изнашиваются, повышается вероятность утечек газа, ДУ не оснащены узлами обеспечения герметичности (УОГ). В связи с этим разработана конструкция по устройству и применению быстросъемных крышек (БСК), устраняющих имеющиеся недостатки, является актуальной научно-практической задачей.

Предлагаемая конструкция узла обеспечения герметичности БСК, созданная на основе предложенного алгоритма [1, 2], включает в себя зазор 8, расположенный между стальными корпусом 1 и пластиной 7 (рис. 1), герметизированной с обеих сторон рабочей 4 и резервной 6 уплотнительными прокладками. Внутренний объем зазора 8 заполняется инертным газом 9 до расчетной величины давления P_p . Таким образом достигается организация постоянного контроля герметичности соединения уплотнительной прокладки 4 с пазом 3 и уплотнительной прокладки 6 с кольцевым пазом 5.

Стальной корпус 1 в боковой своей части имеет канал и трубку 10, к которой через трехходовой кран 16 присоединено автоматическое реле 17, которое срабатывает и сигнализирует: 1) при повышении расчетного давления инертного газа P_p в зазоре 8 на величину его допустимого превышения ΔP_v вследствие утечки газа из внутреннего объема корпуса 2 в кольцевой зазор 8 при нарушении герметичности рабочей уплотнительной прокладки 4; 2) при понижении расчетного давления P_p в зазоре 8 на величину его допустимого снижения ΔP_n вследствие утечки инертного газа из его внутреннего объема 8 в окружающий воздух при нарушении герметичности резервной уплотнительной прокладки 6.

При снижении давления ниже $P_p - \Delta P_n$, когда на реле 17 замыкается контакт 18, или при увеличении давления выше $P_p + \Delta P_v$, когда на реле 17 замыкается контакт 19, двухпозиционное реле 17 включает сигнализаторы 20 и 21. Одновременно с этим двухпозиционное реле 17 пересылает в беспроводном формате сигнал в контрольно-аварийную службу на прекращение подачи газа на рабочие двухступенчатые установки и быстросъемные крышки посредством кранов 22 и электроприводов 23 с одновременным переключением потока газа на аналогичные резервные ДУ и БСК.

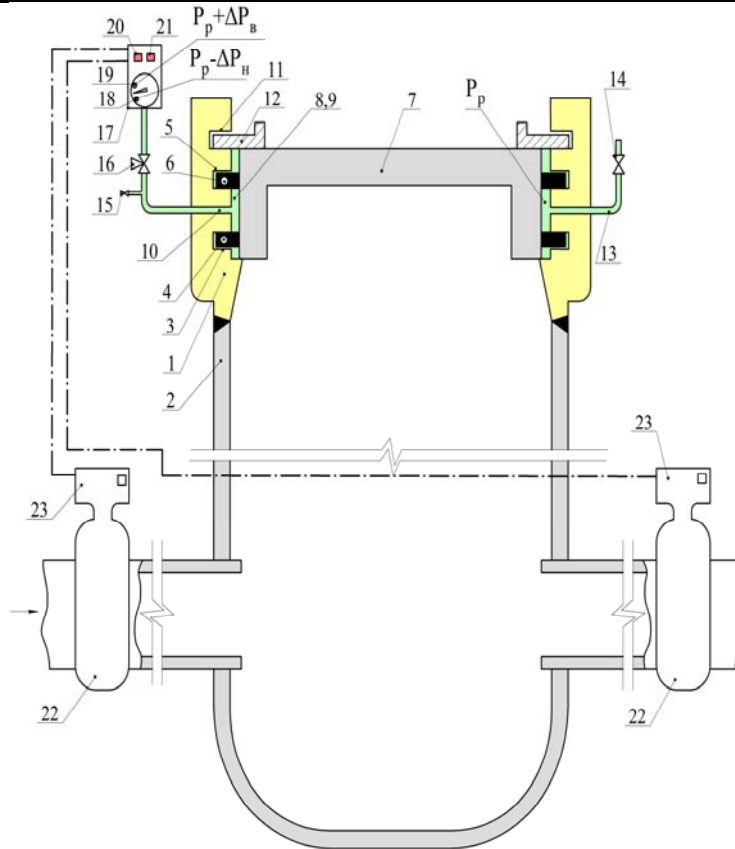


Рис. 1. Новая конструкция узла обеспечения герметичности БСК:

- 1 – корпус быстросъемной крышки; 2 – люк двухступенчатой установки очистки;
- 3 – паз для уплотнительной прокладки 4; 4 – рабочая уплотнительная прокладка;
- 5 – паз для уплотнительная прокладки 6; 6 – резервная уплотнительная прокладка;
- 7 – пластина; 8 – межстенный зазор; 9 – газ, инертный по отношению к углеродистой стали;
- 10 – канал для контроля давления инертного газа; 11 – паз; 12 – сектора фиксирующие;
- 13 – канал наполнительный; 14 – трубка наполнительная; 15 – продувочный вентиль; 16 – кран трехходовой; 17 – реле, контролирующее давление инертного газа; 19 – нижний и верхний расчетные контакты давления инертного газа 9; 20 – световой сигнализатор; 21 – звуковой сигнализатор; 22 – запорное устройство; 23 – электропривод для запорного устройства 22

Расчетное значение давления инертного газа в зазоре 8, равное $P_p=0,04$ МПа, выбрано вблизи минимальной величины, при которой достигается нормальное функционирование реле 17.

Из проведенного анализа видно, что конструкция предложенной УОГ БСК полностью соответствует своей модели [1]. В качестве инертной среды для заполнения внутреннего пространства кольцевого зазора 8 принят технический азот первого сорта по ГОСТ 9293-74.

С целью оценки вероятности исключения коррозионных воздействий на поверхности стальных стенок кольцевого зазора 8, то есть воздействия кислорода и водяных паров, содержащихся в инертном газе, были получены теоретические выражения (1) – (4) для вычисления следующих величин: допустимого понижения давления $P_{доп}^H$, минимальной температуры t_n^{min} и максимальной относительной влажности ϕ_n^{max} . Указанные величины устанавливают границы режимов, исключающих коррозионные воздействия, на поверхность стальных стенок кольцевого зазора 8.

Величина минимального давления инертного газа $P_{доп}^H$ в кольцевом зазоре 8, при которой дальнейшая бескоррозионная эксплуатация не гарантируется, определяется как

$$P P_{доп}^H \leq P_p - \rho_n R (t_n^p - t_n^{min}) Z_n, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{и}}$ – плотность инертного газа в кольцевом зазоре δ , кг/м³; $t_{\text{и}}^{\text{р}}$, $t_{\text{и}}^{\text{мин}}$ – соответственно расчетная и минимальная температуры инертного газа в кольцевом зазоре δ , °С; $Z_{\text{и}}$ – коэффициент сжимаемости; R – газовая постоянная, кДж/кг·К.

Минимальное значение температуры инертного газа $t_{\text{и}}^{\text{мин}}$ определяется согласно основным положениям теплопередачи [3] из уравнения теплового баланса, формулируемого следующим образом: сколько теплоты поступает от воздуха $Q_{\text{в}}$, находящегося в помещении пункта редуцирования газа, через корпус 1 быстросъемной крышки к инертному газу $Q_{\text{и}}$ в кольцевом зазоре 3 (рис. 2), столько же теплоты передается от инертного газа к природному газу $Q_{\text{г}}$, соприкасающемуся с пластиной 5 быстросъемной крышки:

$$t_{\text{и}}^{\text{мин}} \leq t_{\text{в}}^{\text{мин}} - \frac{t_{\text{и}}^{\text{мин}} - t_{\text{г}}^{\text{мин}}}{\frac{1/(1/\alpha_{\text{в}} + \delta_{\text{с}}^{\text{к}}/\lambda_{\text{с}} + \delta_{\text{и}}/2\lambda_{\text{экв}})}{1/(\delta_{\text{и}}/2\lambda_{\text{экв}} + \delta_{\text{с}}^{\text{п}}/\lambda_{\text{с}} + 1/\alpha_{\text{г}})}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{в}}^{\text{мин}}$ – минимальная температура воздуха в помещении ПРГ, °С; $t_{\text{г}}^{\text{мин}}$ – минимальная температура природного газа, °С; $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности прослойки инертного газа, Вт/м·К; $\lambda_{\text{с}}$ – коэффициент теплопроводности стали, Вт/м·К; $\delta_{\text{и}}$ – толщина слоя инертного газа, м; $\delta_{\text{с}}^{\text{к}}$, $\delta_{\text{с}}^{\text{п}}$ – соответственно толщина слоя стальных стенок и корпуса и пластины быстросъемной крышки, м; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от воздуха в помещении ПРГ к стальной стенке корпуса быстросъемной крышки, Вт/(м²·К); $\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент теплоотдачи от стальной съемной пластины быстросъемной крышки к природному газу, Вт/(м²·К).

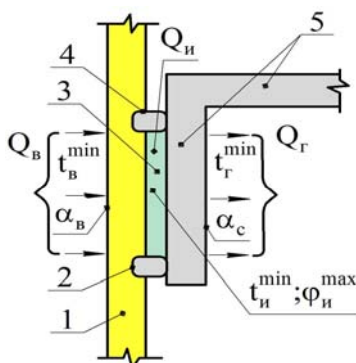


Рис. 2. Расчетная схема для определения режима бескоррозионной эксплуатации в кольцевом зазоре разработанной конструкции УОГ:

1 – цилиндрический корпус БСК; 2 – первая уплотнительная прокладка; 3 – кольцевой зазор, заполненный инертным газом; 4 – вторая уплотнительная прокладка; 5 – съемная пластина

С целью определения допустимых величин снижения давления $P_{\text{доп}}^{\text{н}}$ и температуры $t_{\text{и}}^{\text{мин}}$ инертного газа, при которых обеспечивается бескоррозионная эксплуатация стальных поверхностей кольцевой камеры 3 (см. рис. 2) быстросъемной крышки, по формулам (1) и (2) были проведены соответствующие расчеты. В расчетах были приняты минимальные температуры воздуха и природного газа: $t_{\text{в}}^{\text{мин}} = 5^{\circ}\text{С}$; $t_{\text{г}}^{\text{мин}} = -40^{\circ}\text{С}$.

Результаты вычислений при минимальных значениях температур воздуха и газа $t_{\text{в}}^{\text{мин}} = 5^{\circ}\text{С}$; $t_{\text{г}}^{\text{мин}} = -40^{\circ}\text{С}$ позволили получить значение минимальной температуры инертного газа в кольцевом зазоре 3 $t_{\text{и}}^{\text{мин}} = -22,3^{\circ}\text{С}$ и допустимую величину снижения давления инертного газа вследствие снижения его температуры $P = 0,029$ МПа.

Условием, предупреждающим коррозию на внутренних поверхностях зазора 3, является отсутствие на них капельной влаги. Параметром, определяющим появление капельной влаги на поверхностях кольцевого зазора 3 (см. рис. 2) и, как следствие,

устанавливающим условие их надежной работы, является величина максимальной относительной влажности инертной среды $\varphi_{\text{и}}^{\text{max}}$.

Предлагаемые аналитические зависимости по определению максимального значения относительной влажности инертного газа $\varphi_{\text{и}}^{\text{max}}$, соответствующее его минимальной температуре $t_{\text{и}}^{\text{min}}$, получены согласно теоретическим положениям [4] и выглядят как

$$\varphi_{\text{и}}^{\text{max}} = \frac{d_{\text{и}} \cdot P_{\text{и}}}{\frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{п.н}}} \left(1 + \frac{d_{\text{и}}}{R_{\text{и}} / R_{\text{п.н}}} \right) P_{\text{п.н}} (t_{\text{и}}^{\text{min}})} \quad (3)$$

(при этом условие, при котором невозможны появление капельной влаги на внутренних поверхностях кольцевого зазора 3 и их коррозия, записывается как

$$\tau_{\text{п}} \leq t_{\text{и}}^{\text{min}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{и}}$ – абсолютное давление смеси инертного газа и водяного пара, Па; принимается равным величине минимального давления инертного газа во внутреннем пространстве кольцевого зазора 3 и составляет $P_{\text{и}} = P_{\text{р}} + P_{\text{с}} = 40000 + 101325 = 141325$ Па; $d_{\text{и}}$ – абсолютное влагосодержание, г/кг; принимается при температуре 20°C и давлении $101,3$ кПа; $R_{\text{и}}$, $R_{\text{п.н}}$ – соответственно удельные газовые постоянные для сухого инертного газа (азота) и насыщенного водяного пара, кДж/(кг К); $P_{\text{п.н}} (t_{\text{и}}^{\text{min}})$ – давление насыщенного водяного пара при $t_{\text{и}}^{\text{min}}$, Па; зависит от температуры и определяется по психрометрической таблице; $\tau_{\text{п}}$ – температура конденсации водяных паров, оседающих из инертного газа (азота) на стальных поверхностях кольцевого зазора 3, $^{\circ}\text{C}$.

В результате расчетов по формуле (3) значение относительной влажности технического азота первого сорта по [5] в кольцевом зазоре 3 (см. рис. 2) при минимальной его температуре $t_{\text{и}}^{\text{min}} = -22,3^{\circ}\text{C}$ и рабочем давлении $P_{\text{и}} = 141325$ Па составляет $\varphi_{\text{и}}^{\text{max}} \leq 0,19$, или 19%. Согласно [5] конденсация водяных паров технического азота первого сорта на стальных стенках кольцевого зазора 3 при рабочем давлении $P_{\text{и}} = 136325$ Па будет иметь место при температуре $\tau_{\text{п}} = -43,0^{\circ}\text{C}$. Отсюда согласно (4) следует, что конденсация водяных паров на внутренних поверхностях кольцевого зазора 3 полностью исключается, поскольку $\tau_{\text{п}} \leq t_{\text{и}}^{\text{min}}$ или $-43,0^{\circ}\text{C} \leq -22,3^{\circ}\text{C}$.

С целью проверки теоретических формул (1) – (4) на территории ООО «Новапром» (г. Саратов) были проведены экспериментальные исследования опытного образца ДУ с БСК и узлом обеспечения ее герметичности.

Пространство кольцевого зазора 3 было заполнено инертным газом азотом, поставляемым с кислородной станции в стальных баллонах полезной емкостью 40 литров с давлением $15,1$ МПа. Состав: технический азот первого сорта по [5]: N_2 – 99,6 объемн. %; O_2 – 0,4 объемн. %; H_2O – 0,009 объемн. %; давление газа $15,1$ МПа.

В процессе экспериментальных исследований получены результаты, подтверждающие правомерность применения аналитических зависимостей (1) – (4) по определению величин $P_{\text{доп}}^{\text{н}}$ и $\varphi_{\text{и}}^{\text{max}}$ для технического азота первого сорта, которые показаны на графике в виде сплошных линий (рис. 3,а и рис. 3,б). Для сравнения здесь же в виде отдельных точек показаны экспериментальные значения.

Каждая экспериментальная точка, показанная на графике, принималась как среднее из четырех измерений ($n=4$). По заданной надежности полученных результатов, равной $\alpha=0,9$, и четырем произведенным измерениям ($n=4$) коэффициент Стьюдента составляет $t_{\alpha=0,9} = 2,35$. Среднее отклонение расчетных и экспериментальных значений для $P_{\text{доп}}^{\text{н}}$ составляет 10,6 %, для $\varphi_{\text{и}}^{\text{max}}$ – 12,8%.

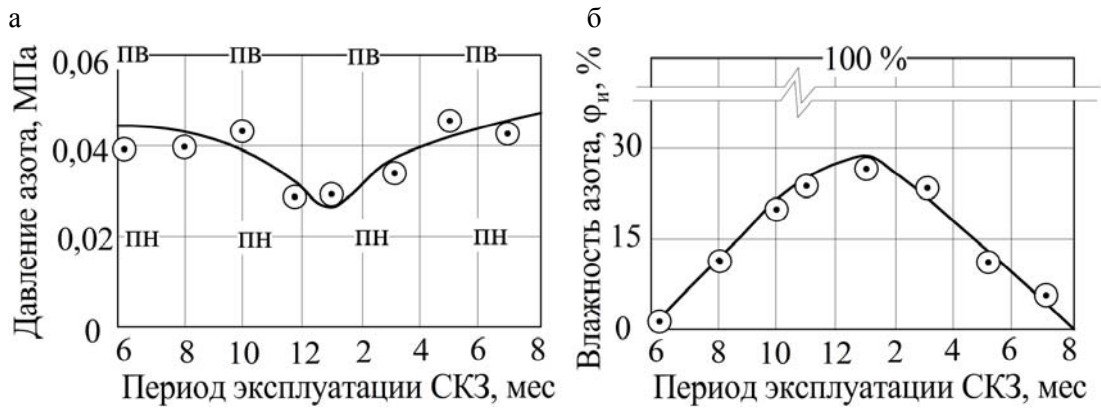


Рис. 3. Результаты экспериментальной проверки:

а – аналитических зависимостей (1) и (2) по определению $P_{\text{доп}}^{\text{н}}$, $t_{\text{н}}^{\text{мин}}$ для инертного газа;

б – формулы (3) по определению $\varphi_{\text{н}}^{\text{max}}$.

— — теоретические значения давления и влажности; \odot – экспериментальные значения; -пн-пн- и -пв-пв- – соответственно предельные нижняя и верхняя границы, при которых срабатывает двухпозиционное реле давления; цифры на горизонтальной оси обозначают номера месяцев, например: 12 – декабрь

Выводы

1. Разработаны аналитические зависимости (1)–(4) для определения значений минимального давления и максимальной влажности инертного газа, при которых достигается режим бескоррозионного функционирования всех стальных элементов узла обеспечения герметичности БСК.

2. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают аналитические зависимости (1)–(4) для определения значений минимального давления и максимальной влажности инертного газа в узле обеспечения герметичности и позволяют рекомендовать их к применению в проектной и эксплуатационной практике. В качестве инертного газа доказано использование технического азота первого сорта.

Список литературы

1. Пат. 165142 Российская Федерация, МПК F16J 13/08 (2006.01). Узел перекрытия люка газового оборудования высокого давления / Шурайц А.Л., Усачев А.П., Усуев З.М. [и др.], заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрониигаз – № 2016101484/06; заявл. 19.01.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28. – 6 с.
2. Усачев, А.П. Разработка модели узла обеспечения герметичности быстростъемной крышки газового фильтра / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирюков, З.М. Усуев // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38). – С. 171–177.
3. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
4. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В.Н. Богословский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1982. – 415 с.
5. ГОСТ 9293-74 (ИСО 2435-73). Межгосударственный стандарт. Азот газообразный и жидкий. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007.

References

1. Pat. 165142 Russian Federation, IPC F16J 13/08 (2006.01). Node overlap hatch gas equipment high pressure / Shurayts A. L., Usachev A. P., Usuev Z. M. [et al.], applicant and patent holder of JSC «Giproniigaz» No 2016101484/06; application 19.01.2016; publ. 10.10.2016, bul. No. 28 – 6 p.

2. Usachev, A.P. Development of a model for ensuring tightness of a quick-release gas filter cover / A.P. Usachev, A.L. Shuraitis, A.V. Biryukov, Z.M. Usuev // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1(38). – P. 171–177.

3. Mikheev, M.A. The basics of heat transfer / M.A. Mikheev, I.M. Mikheeva. – M.: Energy, 1973. – 320 p.

4. Bogoslovsky, V.N. Construction thermophysics (thermophysical basics of heating, ventilation and air conditioning) / V.N. Theological. – 2nd ed., Revised. and add. – M.: Higher. school, 1982. – 415 p.

5. GOST 9293-74 (ISO 2435-73). Interstate standard. Gaseous and liquid nitrogen. Technical conditions – M.: Standartinform, 2007.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 721.72.01:502

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

Лапшина Елена Геннадьевна,
кандидат архитектуры, профессор,
зав. кафедрой «Основы архитектурного проектирования»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Сухов Ярослав Игоревич,
аспирант
E-mail: yaroslavsuhov@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

Lapshina Elena Gennadijevna,
Candidate of Architecture, Professor,
Heard of the department «Fundamentals of Architectural Design»
E-mail: tgv@pguas.ru

Sukhov Yaroslav Igorevich,
Postgraduate student
E-mail: yaroslavsuhov@yandex.ru

ДИНАМИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА В ПРОСТРАНСТВЕ СОВРЕМЕННОГО ГОРОДА

Е.Г. Лапшина, Я.И. Сухов

Рассмотрены виды динамической архитектуры, неотъемлемые компоненты, которые ее составляют, их характер, принцип работы и взаимодействие с окружающей средой, проанализированы и исследованы механизмы и технологии, заложенные в идею движущихся зданий. Отмечено, что понятия динамической архитектуры и кинетической формы в архитектуре следует определить более четко, предлагается их разграничение с позиции анализа движения архитектурной формы, ее элементов относительно целого и формы в целом – в окружающем пространстве. Изучены иностранные и отечественные публикации и материалы, связанные с технологиями, проектированием и реализацией трансформируемых архитектурных объектов, а также подходы к формированию динамичной окружающей среды. В качестве метода исследования использовался сравнительный анализ законов движения, выявленных в механике и строительных науках, предпринята попытка их адаптации к архитектуре, выявления принципов движения архитектурных объектов и трансформации городского пространства. Сформированы основные понятия динамической и статической, кинетической и кинематической архитектуры на основе законов движения архитектурных объектов и их взаимодействия с окружающей средой, рассмотрены механическая трансформация и динамика визуального образа архитектурного пространства.

Ключевые слова: архитектура, движение, динамика, пространственная форма, конструкция, городская среда

DYNAMIC ARCHITECTURE IN SPACE OF A MODERN CITY

E.G. Lapshina, Ya.I. Sukhov

Types of dynamic architecture, the integral components that make it up, their nature, working principle and interaction with the environment are considered. Mechanisms and technologies embedded in the idea of moving buildings are analyzed and studied. It is noted that the concepts of dynamic architecture and kinetic form in architecture should be defined more clearly, and their differentiation is proposed from the position of analyzing the movement of the architectural form, its

elements relative to the whole and the form as a whole – in the surrounding space. Foreign and domestic publications and materials related to technologies, design and implementation of transformable architectural objects as well as approaches to the formation of dynamic environment are studied. As a research method was a comparative analysis of the laws of motion identified in mechanics and construction. An attempt to adapt them to architecture, identify the principles of movement of architectural objects and the transformation of urban space was undertaken. The basic concepts of dynamic and static, kinetic and kinematic architecture are formed on the basis of the laws of movement of architectural objects and their interaction with the environment, the mechanical transformation and dynamics of the visual image of architectural space are considered.

Keywords: architecture, movement, dynamics, spatial form, construction, urban environment

ВВЕДЕНИЕ

Динамическая архитектура – это не просто движущееся здание, это, с одной стороны, сложный конструктивный механизм, с другой – динамичный художественный образ, способный вызвать сильные эмоции в каждом человеке. Действительно, движение в архитектуре бывает разным. Можно сказать, что пространственная форма зданий и сооружений находится в непрерывно изменяющемся состоянии.

Сегодня динамическая архитектура, несущая в себе идеи движения, пластики и трансформации, может быть выражена и в художественно-образной форме, визуальной имитации движения, и посредством создания способных к реальному движению зданий и сооружений.

При создании визуально динамичных архитектурных объектов применяются специальные приемы, включающие как конструктивные особенности зданий и сооружений, так и используемые при их строительстве материалы.

ДВИЖЕНИЕ В ДИНАМИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Движение в динамической архитектуре мы подразделяем на два вида:

1. Механическое движение архитектурной формы, трансформация частей здания (фасадов, кровли, планировка этажей).



2. Визуальное движение формы, модификация светового образа здания.



Механическое движение тела рассматривается в физике и механике как изменение его положения в пространстве относительно других тел или относительно определенной системы координат с течением времени.

В механике есть несколько разделов, в которых изучается движение тел: кинематика и кинетика, в свою очередь, включающая динамику и статику.

Кинематика представляет собой часть механики, в которой изучается движение материальных тел без учета их масс и действующих на них сил.

Кинетика – раздел механики, в котором исследуется механическое состояние тела в связи с физическими причинами, его определяющими. Кинетика разделяется на динамику и статику.

Статика представляет раздел механики, в котором изучаются условия равновесия систем под действием приложенных к ним сил и моментов.

Динамика – это раздел механики, который изучает взаимодействие тел, причины возникновения движения и тип возникновения движения.

При рассмотрении движения фигурирует такое понятие, как инертность (или инерция). Это свойство физических тел, способных сохранять движение, а также изменять его под действием сил. Физическое тело при взаимодействии с другими телами может изменить свое движение. Если оно не взаимодействует ни с какими другими телами, значит, нет и внешних сил, приложенных к телу, движение его не изменяется (в инерциальной системе отсчета). Инертность характеризует определенные черты поведения тел. Она показывает, как тело может сохранять движение, как может его изменять под действием сил – быстрее или медленнее. Сохранять «состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения» – это значит, сохранять неизменной по величине и направлению скорость (в частном случае равную нулю – состояние покоя). Грамотное представление о движении в свое время сформулировал Исаак Ньютон и выразил это в трёх законах [1].

Первый закон Ньютона. Любое материальное тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока внешнее воздействие не изменит это состояние.

Изменение состояния движения какого-либо тела всегда вызывается действием на него сил. Сила как количественная мера взаимодействия тел характеризуется не только своей величиной, но и направлением, а также точкой приложения.

Примером может служить принцип работы мельницы (рис.1).

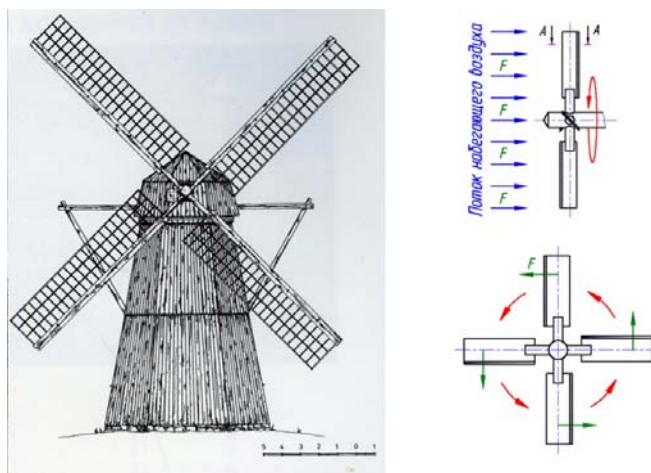


Рис. 1. Схема работы мельницы при воздействии внешних сил

Сама по себе конструкция находится в состоянии покоя, но под действием ветрового потока, воздействующего на лопасти мельницы с силой F , возникает крутящий момент и конструкция сооружения приходит в движение.

Второй закон Ньютона описывает, что происходит с массивным телом, когда на него воздействует внешняя сила. Он гласит: сила, действующая на объект, равна произведению массы этого объекта на его ускорение. Математическая формула закона

$$F = ma,$$

где F – сила; m – масса; a – ускорение.

Жирные буквы указывают, что сила и ускорение являются векторными величинами, это означает, что они имеют как величину, так и направление.

Третий закон Ньютона показывает, что взаимодействие – это действие одного тела на второе и равное ему противодействие второго тела первому. Это значит, что источником воздействия для первого тела является второе, и поскольку силы действия и противодействия приложены к разным телам, их нельзя складывать, а действующие силы – заменять равнодействующей [2]:

$$F_1 = -F_2.$$

Руководствуясь понятиями механики и их методами изучения движения тел, можно выразить общее определение динамической составляющей, которая характеризуется быстрым изменением во времени значения, направления или точки приложения силы, вызывающей в элементах конструкции значительные силы. Рассмотрим архитектурный объект с точки зрения механического движения. Если он посредством собственных конструктивных особенностей способен с течением времени изменять свой облик в результате трансформации внешнего и внутреннего объемов, то он может характеризоваться как динамический. Если, кроме того, он способен изменять свое положение в пространстве, он характеризуется как кинематический.

Основная идея, выдвигаемая нами, состоит в следующем. Определенная система, в данном случае это архитектурный объект, изначально находится в состоянии покоя, но при возникновении внешних факторов, действующих на него, начинает реагировать на них и трансформироваться согласно этому воздействию.

В настоящее время, в век развития цифровых технологий части здания могут приходиться в движение не только под воздействием сил природы. Сегодня движение здания могут контролировать компьютерные программы и заданный алгоритм.

Визуально-художественный образ способен взаимодействовать с окружающей средой, но уже более активно влияя на окружение. В таком случае здание не трансформируется под воздействием внешних сил, а наоборот: изменяя свой внешний облик, воздействует на среду. Это определяет образ здания и то, как человек будет воспринимать объект и окружающее пространство, задавать ему особый ритм и настроение. Инструментами такого влияния на трансформацию пространства может выступать как кинематическое движение механических объектов, так и игра света, цвета, отражений на поверхности формы посредством изменения их интенсивности, направления и частоты [3].

Чтобы создать визуально динамичный архитектурный образ, используют определенные правила и методы геометрического построения, которые определяют конструктивные и художественные особенности объектов, а также материалы, применяющиеся при их строительстве [4].

В качестве примера выполнения подобных проектов рассмотрим Башню Татлина (рис. 2, 3), которая содержит в себе все аспекты динамики – от работы конструкций при восприятии динамических нагрузок до визуального движения формы.

Для начала обратим внимание на несколько конструктивных особенностей башни и на то, какие нагрузки она воспринимает. Башня состоит из секций, имеющих решетчатую структуру, основными элементами которой являются пояса, распорки, раскосы и диафрагмы. Такая структура заимствована у фермы, из которой, по сути, и состоит тело башни. Пояс и наклонный ствол (мачта) воспринимают на себя основную часть нагрузки. Распорка и стойки с раскосами являются горизонтальным и наклонным элементами решетки. Между поясами и раскосами ставятся дополнительные элементы – шпренгели, они должны уменьшить расчетную длину отдельно взятого

раскоса или пояса. Таким образом, отдельно взятый элемент при меньшей расчетной длине будет обладать более высокой устойчивостью. Пространственную жесткость обеспечат диафрагмы, установленные с определенным шагом по высоте башни [5, 6].



Рис. 2. Башня Татлина. Схема работы конструкции под воздействием механических сил

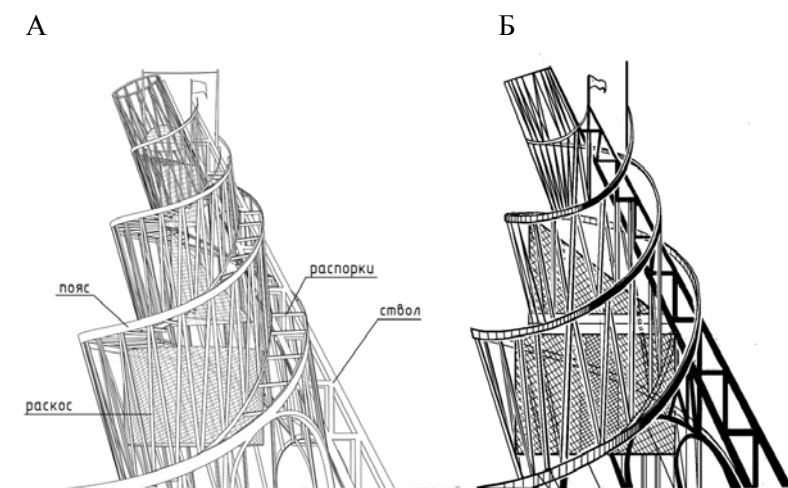


Рис. 3. Фасад башни Татлина.

А – графическая реконструкция Е.Лапшиной (1990); Б – эскиз В.Татлина (1919–1920)

Основным сочетанием нагрузок при расчете башен выше 5 метров является ветровой напор на конструкцию ствола. Ветровая нагрузка складывается из средней и пульсационной, пульсационная составляющая ветровой нагрузки, в свою очередь, является динамической, и при ее определении используется коэффициент динамичности. Строительная механика исследует то обстоятельство, что нагрузка динамическая характеризуется быстрым изменением во времени ее значения, направления или точки приложения. Это вызывает в элементах конструкции значительные силы, что вынуждает башню временами совершать колебательные движения.

Помимо основного каркаса жёсткости, внутри башни друг над другом расположены четыре кинематических сооружений в виде геометрических фигур: куб, пирамида, цилиндр и полусфера. Каждый из этих объектов должен находиться в постоянном движении, демонстрируя трансформацией своего положения, как течет время. Куб совершал полный оборот вокруг своей оси за год, пирамида – за месяц, цилиндр – за сутки, полусфера – за час.

Динамическая архитектура имеет определенные конструктивные, функциональные и образные особенности. После динамических преобразований структура получает другую архитектурную композицию, новую трехмерную пространственную характеристику. Архитектурная динамика может быть выражена как художественной имитацией формы, так и построением зданий и сооружений, способных к реальному движению. Художник Владимир Татлин наглядно и убедительно продемонстрировал

образные возможности диагональной динамики. «Безудержный» диагональный динамизм здания, спроектированного этим всемирно известным авангардистом, как нельзя более соответствует функции предложенного им здания-памятника, при этом визуальная стремительность общей динамичной формы усиливается множественными поуровневыми членениями [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие века здания, как правило, были неподвижны и при этом хорошо справлялись со своей задачей. Здания, пришедшие в движение, – это новый эволюционный скачок в подходе к решению задач, поставленных при проектировании комфортной и безопасной среды жизнедеятельности человека.

Рассмотрев, как работает динамическая и кинематическая архитектура, какие принципы и механизмы заложены в идею динамической формы, проанализировав процесс и характер взаимодействия таких зданий с окружающей средой, можно утверждать, насколько принципиально сегодня изменился процесс проектирования городского пространства. На новом витке эволюции пространственного развития человечества, при правильном использовании инструментов динамической и кинематической архитектуры она может как в прямом, так и в образном понимании трансформировать жизнь человека. Возрастает степень ответственности при проектировании современных городских пространств. На смену статичным архитектурным формам приходят динамичные, кинематические формы зданий и сооружений, Человек способен создавать с помощью трансформируемых форм бесконечное множество вариантов окружающей его среды.

Научно обоснованный подход к использованию новейших технологических разработок в области строительных конструкций и материалов при проектировании «живых» зданий может значительно повысить эффективность функциональной, конструктивной и образной составляющих городского пространства.

Список литературы

1. Силенко, П.Н. Теоретическая механика / П.Н. Силенко. – М.: Моск. гос. ун-т печати, 2002. – 152 с.
2. Масленников, В.А. Динамические характеристики движений человека / В.А. Масленников // Биомеханика. – Великий Новгород, 2008. – Режим доступа: https://studopedia.net/9_51755_sili-passivnogo-protivodeystviya.html
3. Лапшина, Е.Г. Динамические свойства архитектурного пространства / Е.Г. Лапшина. – Пенза, ПГУАС, 2014. – 327 с.
4. Сапрыкина, Н.А. Динамическая адаптация архитектурных объектов: автореф. дис... д-ра архитектуры / Н.А. Сапрыкина. – М.: МАрХИ, 1999. – 77 с.
5. Колотов, О.В. Металлические конструкции / О.В. Колотов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2010. – 100 с.
6. Павловский, В.Ф. Стальные башни (проектирование и монтаж) / В.Ф. Павловский, М.П. Кондра. – Киев: Издательство «Будівельник», 1979. – 200 с.
7. Заварихин, С.П. Статика – динамика / С.П. Заварихин // Архитектура: композиция и форма. – М.: Изд.Юрайт, 2019. – 186 с. – Режим доступа: https://studme.org/161825/kulturologiya/statika_dinamika

1. Silenko, P. N. Theoretical mechanics / P.N. Silenko. – M.: Moscow state University. UN-t press, 2002. – 152 p.
2. Maslennikov, V.A. Dynamic characteristics of human movements / V.A. Maslennikov // Biomechanics. – Veliky Novgorod, 2008. – URL: https://studopedia.net/9_51755_sili-passivnogo-protivodeystviya.html
3. Lapshina, E.G. Dynamic properties of architectural space / E.G. Lapshina. – Penza: PGUAS, 2014 – 327 p.
4. Saprykina, N.A. Dynamic adaptation of architectural objects: autoref. dis ... of the doctor of architecture / N.A. Saprykina. – M.: MARKHI, 1999. – 77 p.
5. Kolotov, O.V. Metal structures / O.V. Kolotov. – N. Novgorod: NNGASU, 2010. – 100 p.
6. Pavlovsky, V.F. Steel towers (design and installation) / V.F. Pavlovsky, M.P. Kondra. – Kiev: Budivelnik publishing house, 1979. – 200 p.
7. Zavarikhin, S. p. Statika-Dinamika / S. P. Zavarikhin // Architecture: composition and form. – M.: Yurayt, 2019. – 186 p. – URL: https://studme.org/161825/kulturologiya/statika_dinamikaLITERATURE

УДК 72:81:628.93

*Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова*

125009, Россия. Москва,
ул. Большая Никитская, д. 3, стр. 1

Стеклова Ирина Алексеевна,

доктор искусствоведения, доцент,
профессор кафедры «Семиотика и общая
теория искусства»

E-mail: i_steklo60@mail.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

Веслополова Галина Николаевна,

кандидат архитектуры, профессор кафедры
«Основы архитектурного проектирования»

E-mail: galina.veslopolova@yandex.ru

Студия Digital Oxygen

440013, Россия, Пенза, ул. Дружбы, д. 6.

Стеклов Александр Михайлович,

исследователь, 3D-художник

E-mail: archireckless@gmail.com

*Moscow State University named after
M.V. Lomonosov*

Russia, 125009, Moscow, 3, build. 1,
Bolshaya Nikitskaya St.,

Steklova Irina Alekseevna,

Doctor of Art History, Associate Professor,
Professor of the department «Semiotics and
General Art Theory»

E-mail: i_steklo60@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

Veslopolova Galina Nikolaevna,

Candidate of Architecture, Professor of the
department «Basic Architectural Design»

E-mail: galina.veslopolova@yandex.ru

Digital Oxygen studio

Russia, 440013, Penza, 6, Friendship St.

Steklov Alexander Mikhailovich,

Researcher, 3D artist

E-mail: archireckless@gmail.com

СВЕТОПРОСТРАНСТВО ГОРОДА: МЕЖДУ ЭМПИРИЧЕСКОЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ

И.А. Стеклова, Г.Н. Веслополова, А.М. Стеклов

Представляются особенности современных городских светопространств как объектов светодизайна – экспериментального вида архитектурно-художественной практики, который оперирует принципиально новыми возможностями искусственного света. Рассматривается тенденция виртуализации светопространств и ее резкое усиление с подачи цифровых технологий.

Ключевые слова: город, архитектурное пространство, светопространство, светодизайн, цифровые технологии, эмпирическая реальность, виртуальная реальность

URBAN LIGHT SPACE: BETWEEN EMPIRICAL AND VIRTUAL REALITY

I.A. Steklova, G.N. Veslopolova, A.M. Steklov

Features of modern urban lighting spaces as objects of light design – an experimental type of architectural and artistic practice are presented, which operates fundamentally new opportunities of artificial light. The trend of light spaces virtualization and its sharp strengthening with the supply of digital technology is considered.

Keywords: city, architectural space, light space, light design, digital technologies, empirical reality, virtual reality

Введение

То, что принято называть светодизайном, принадлежит как искусству, так и ремеслу. В диалектическом взаимодействии первого и второго светодизайн становится собой – архитектурно-художественной практикой, которая преобразует эмпирическую реальность путем переформатирования архитектурных пространств в светопро-

странства. Данная практика движима и прагматическими, и романтическими соображениями. С одной стороны, она обустроивает элементарную среду жизнедеятельности, с другой – мягко выталкивает ее обитателей из круга заземленных потребностей, стимулирует познание, «внушает эмоции, подсказывает формы поведения» [1, с. 18]. Соответствующий вид проектирования, по мысли А. В. Иконникова, представляет классическую тактику увязывания, упорядочения, гармонизации материально-функциональных и смысловых аспектов, «из которых вырастает эстетическое» [1, с. 17]. В насущной потребности этого проектирования, экспериментального и консервативного одновременно, можно убедиться, например, по качественному приращению ландшафта Москвы, ночные виды которого превосходят дневные по красоте и логике (рис. 1).

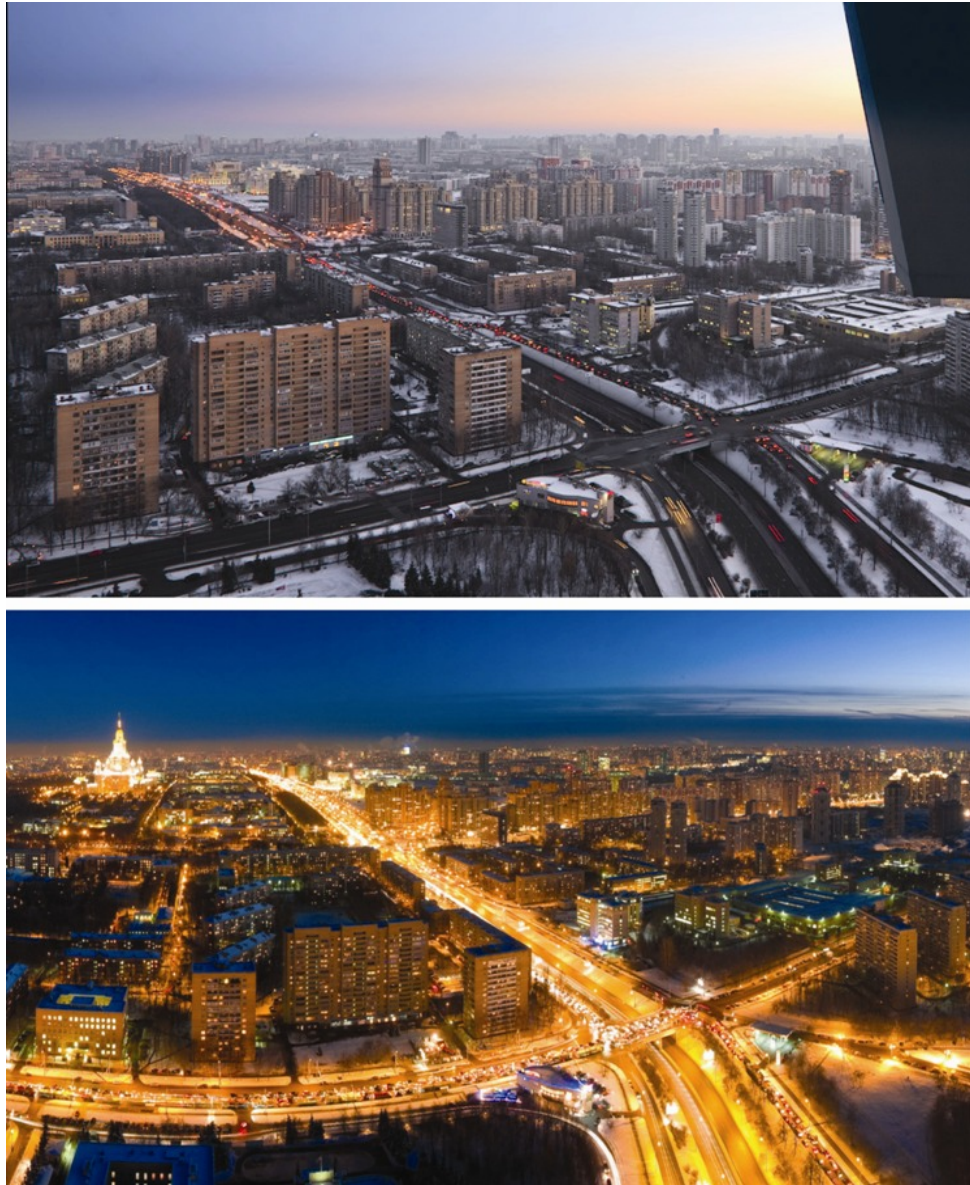


Рис. 1, 2. Москва. Виды на пересечение Мосфильмовской и Минской улиц

Отечественная история оснащения, структурирования, декорирования городской среды силами искусственного света насчитывает полторы сотни лет. К хрестоматийным прецедентам содействия объемно-пространственным доминантам в древней столице относятся манипуляции с «колокольней Ивана Великого, которую в 1883 г. нарядили в три с половиной тысячи электрических лампочек» [2, с. 17]. Однако автономия профессиональной специфики светодизайна проявилась в России, да и во всем мире,

когда арсенал его возможностей обновили технологии, основанные на IT-системах. Благодаря этим технологиям, а также собственной мобильности и футуристической предрасположенности, развитие светопространств опережает ход любого строительства, что требует всестороннего осмысления.

Архитектурное пространство и виртуальная реальность

Прежде всего, следует отступить к тому, что стрессу революционного IT-обновления подвергся весь творческий поиск, занятый организацией архитектурного пространства. Стойко сопротивляясь периодическим попыткам формализации в старании «воплотить абсолютный идеал не в одном воображении, а и в самом деле, <...> одухотворить, пресуществить нашу действительную жизнь» [3, с. 89], он сдался, наконец, под натиском бесстрастных цифровых алгоритмов. Началась цепная реакция модернизации всех направлений и стадий «пресуществления». Архитекторы и дизайнеры сразу же оценили ее колоссальные преимущества. Прежде всего, они включились в совершенствование базовых программ по выполнению традиционной проектной документации, а также по трехмерному моделированию, графическому редактированию, сборке и анимированию объектов и инфраструктур. В частности, игры с «путями, границами, районами, узлами и ориентирами» [4] города в виртуальном поле компьютера стали одним из главных трендов городского планирования последних десятилетий.

Компьютер взял на себя ответственность не только за громадную инженерную работу, но и за полный цикл претворения идей, проступающих из сумрачного небытия. Тогда согласно мониторингу А. Асановича и проявилась его триединая инновационная сущность как инструмента, соавтора и «генератора виртуальной реальности» [5, с. 9], которую также называют альтернативной, выдуманной, трансцендентной и т.д., умудряющейся совмещать истинное и мнимое, материальное и идеальное, реальное и духовное, физическое и метафизическое, предельное и запредельное и т.п.

Справедливо заметить, что понятие виртуальности вброшено не компьютером. Оно возникло в IV в., а с XVII в. прочно закрепилось в гуманитарной и естественно-научной сферах. Наслоения нынешнего содержания достигли оптимального объема в последней четверти XX в. Обсуждаемые технологии скорее актуализировали его, привлекли внимание к виртуальности в ее универсальном значении как к повсеместно востребованной, вдохновляющей виртуальной реальности, пребывающей в собственном времени и пространстве. Хоружий С.С., в частности, позиционирует виртуальную реальность между всякой потенциальностью и действительностью, в частичном или «недовоплощенном» виде, без «тех или иных сущностных черт явлений обычной эмпирической реальности» [6, с. 58].

Что касается виртуальной реальности собственно архитектурного пространства, то эта тема имеет не менее глубокие корни. Пожалуй, в настоящее время, в частности в исследованиях А.С. Ивановой, Л.В. Савельевой, Н.А. Сапрыкиной, А.В. Чистякова и т.д., она связывается с имманентной опорой профессии на эстетику оптических иллюзий. Особо важным в контексте данного рассуждения представляется то, что приблизительно с XV в. целенаправленным конструированием зрелищных обманок заинтересовался театр, решивший прибегнуть к помощи градостроителей для воссоздания подобного в периметре сценического портала. Получив дополнительную площадку, изолированная миниатюрность которой обусловила задачу компактной, концентрированной интерпретации, экспериментирование с разного рода трансцендентными эффектами получило публичное признание, перефокусировав и взгляды зодчих, и ожидания обывателей. Убеждение в том, что архитектурное пространство уполномочено отвечать за качество связи между действительностью и виртуальностью как между двумя взаимообусловленными планами бытия, превратилось в константу общественного мнения. Мало кого удивляет, к примеру, что именно его стилистическим трансформациям: «мистериальному, вертикально-иерархическому пространству средних веков, геометрически-оптическому пространству Ренессанса, театрално-драматическому пространству барокко, рационализованному, динамическому простран-

ству» [7, с. 89] современности – приписывается наиболее емкое выражение истинных значений эволюции человечества и миропонимания в целом.

Примерно так архитектурное и прежде всего городское пространство стало легитимным местом и средством напряженного интеллектуально-чувственного диалога с образами, доносящими и актуальные смыслы эпохи, и вневременные ценности. Отражая сущность как эмпирической, так и виртуальной реальности в отдельных элементах и их общности, оно воспринимается амбивалентным до сих пор. Компьютер вмещался и сюда, спрямив извилистую дистанцию от частного, интимного восприятия двойственного потенциала архитектурного пространства до его массового освоения, если не сказать, менеджмента и капитализации.

Первые масштабные предложения поступили от интерактивных произведений мультимедиа: реклам, шопингов, рынков, тренажеров, образовательных программ, видеоигр, сработавших безотказно. В них через синтез сюжета, изображения, звука начали осуществляться динамические репрезентации виртуальной реальности, управляемые дистанционно, в синхронном режиме. Оказалось, что в построенные на компьютере аудиовизуальные среды экстерьеров и интерьеров здешего или иного мира можно легко перенестись, свободно и спонтанно контактировать с ними и почти физически испытывать все ощущения подлинности. По признанию Г. Бетанкура, одного из создателей видеоигр «Call of Duty» и «Tomb Raider Underworld», немалая роль в пробуждении этих ощущений отводится работе со светом, который пропускается через туман, дождь, пыль и т.д.

Успех спроектированного в мультимедиа инобытия превзошел все ожидания, явившись зеркалом ценностного вакуума, реакцией «коллективной психики на десакрализацию, расколдовывание и гиперрационализацию культуры» [8, с. 23]. Закономерно, что его сразу же отсканировала и предприимчивая архитектурно-художественная практика. Это отозвалось, например, в изобретении чутких домов Л. де Гарридо, реагирующих на освещение, температуру, влажность, шум, как в видеоигре «Elvenar», или систем оперативного управления инфраструктурами для американских и южнокорейских городов, подражающих нейросети Чикаго из видеоигры «Watch Dogs».

Вопреки многообразию порожденного позитива, суть легкодоступных аудиовизуальных сред, исключительно наглядно транслирующих «потенциальные сценарии жизни» [9, с. 6], истолковывается как «прогрессивная и регрессивная» [10, с. 13]. Причем второй точки зрения придерживаются такие авторитеты, как Ж. Бодрийяр, Ж. Делёз, П. Вирильо и др., считающие экспансию компьютерной виртуальности угрозой ментально-психологическому суверенитету индивидуумов на антропологическом уровне. Лимит форсирования виртуальности В.В. Бычков и Н.Б. Маньковская усматривают в возможностях не техники, а человека: «Есть основания предполагать, что эти возможности далеко не беспредельны и не безопасны <...> для сохранения им своей личности, своей аутентичности» [11, с. 35].

Стратегия и тактика виртуализации светопространств

С подачи компьютера, приобщающего к бытию самые дерзкие фантазии, виртуальная реальность архитектурного пространства стала предметом широких междисциплинарных дискуссий. По логике О. Амлена, уже на мониторе фантазии становятся интеллектуальной и эстетической принадлежностью мира, в котором две реальности: эмпирическая и виртуальная – пристально всматриваются друг в друга и обнаруживают множество взаимных преломлений. Собственно, посредством компьютерных визуализаций эмпирическая реальность манифестирует свою ориентацию на виртуальную реальность, которая призвана снимать экзистенциальную ограниченность бытия, помогать выходить «за пределы смерти, времени и тревоги; аннулировать свою заброшенность и конечность, достичь безопасности и святости» [12].

В роли незаменимого в темное время суток транслятора виртуальной реальности выступает искусственный свет – безубыточный расходный материал и инструмент гарантированного повышения зрелищности вообще. Мастерство светодизайна наприя-

мую обращается к эмоциональному, чувственному опыту человека и создает вторую реальность, едва ли не более явственную и впечатляющую, чем первая. Именно оно показывает, насколько сильно в XXI в. эмпирическая реальность подвергается воздействию виртуальной реальности. Иванов Д.В. называет это массивное воздействие «виртуализацией» [13, с. 30], подразумевая вытеснение реальности футуристическими образами, концептуализирующими не настоящее, а предстоящее.

Самые дорогостоящие витрины мира: Бильбао, Грац, Дюссельдорф, Роттердам, Мумбаи и т.д. – действительно, намеренно делают упор на демонстрации экзальтированных образов малопонятного будущего, настойчиво напоминая о неизвестности, неопределенности, ненадежности. Престижные площадки современности, преображенные звездами мировой архитектуры, скорее вопрошают, а не обнадеживают людей, скрепящая посредством света явственную эмпирическую и фантомную виртуальную реальность до некоего «гибридного» [14, с. 42] состояния. Усиление желания обескураживать, шокировать, потрясать наблюдается в потоке объемно-пространственных решений более четырех десятилетий и объясняется И.А. Добрицыной неизбежной включенностью авторов в бесконечные постмодернистские игры, в «подвижное развертывание принципиально не завершаемого мыслительного процесса» [15, с. 41].

Собственно, на практике наблюдаются две тактики виртуализации – для организации открытых и локальных светопространств. Потребность в первой возникает, как правило, в связи с исключительными событиями, вторая же последовательно, шаг за шагом обслуживает будничную среду, функционально развивает и художественно обогащает ее. Обе тактики вооружены одними и теми же технологиями и оборудованием, позволяющим оперировать различными видами искусственного света: заливающего, фонового, контурного, кинетического, интерактивного и т.п.

1. Тактику виртуализации открытых светопространств представляют комплексные мероприятия: тематические представления, светодинамические феерии, голографические и лазерные шоу с проекциями на фасады, водоемы, облака и т.д. Они периодически устраиваются от Лиона до Сиднея, оживляя и старые кварталы, и временные пустыри в районах новостроек. Здания, набережные, площади превращаются в стереоскопию мерцающих картин, которые запускаются, словно череда кинокадров (рис. 3). Одним из наиболее резонансных праздников света стал ежегодный фестиваль медиаискусств в Праге с показом красочных светоинсталляций «Signal», умеющих видоизменять историческую застройку до неузнаваемости, раскачивать, переворачивать, растворять ее на глазах у зрителей.



Рис. 3. Лион. Фестиваль света. 2016 г.

Через высокотехнологичную режиссуру кубатуры совершенно непохожих городов становятся волшебными аттракционами и проявляют свойства, родственные как между собой, так и со свойствами пространств, которые раскрываются в видеоиграх. Они не только раскрепощают воображение и поведение людей, но и буквально пленяют. Проблема в том, что их гибридность, органическая слитность эмпирической и виртуальной реальности достигает такого уровня художественной проникновенности, который начинает восприниматься как норма. Понятно, что это может дезориентировать, оборачиваться нарушением понимания причинно-следственных связей происходящего, инверсией базовых представлений о жизни с весьма непредсказуемыми последствиями.

2. Провокационные футуристические образы подспудно проникают и в повседневную жизнь горожан. Светящиеся доминанты формируют локальные, относительно компактные светопространства. С помощью света архитекторы и дизайнеры либо подчеркивают тектонику доминант, либо пренебрегают тектоникой в интересах решения привносимой образной темы. Данную развилку иллюстрируют: с одной стороны, «Tower of winds» Тойо Ито в Токио, своего рода аудиовизуальный сейсмограф, оповещающий об уровне ветра, шума, влажности (рис. 4); с другой – небоскребы «St Mary Axe» Нормана Фостера в Лондоне и «Torre Agbar» Жака Нувеля в Барселоне. Чтобы «St Mary Axe» выглядел, как драгоценный кристалл, было произведено замещение «некогда активных монументальных архитектурных элементов на иллюзорные экраны» [16, с. 24] (рис. 5). А для того, чтобы «Torre Agbar» напоминал столп света, его фасадную поверхность выстлали четырьмя тысячами живописно переливающихся светозащитных элементов (рис. 6). Принципиальное для создания имматериального образа световое оборудование применялось Нувелем и в дуэте разновеликих сиднейских башен «One Central Park», объединенных на уровне 29 этажа навесами из гелиостатов, которые работают по ночам как автономная светоинсталляция.



Рис. 4. «Tower of winds»,
Токио



Рис. 5. «St Mary Axe»,
Лондон



Рис. 6. «Torre Agbar»,
Барселона

Локальная виртуализация светопространств достигает предельного драматизма на площадках всемирных выставок, где экспонатами становятся сами национальные павильоны. Это, например, британские павильоны «Seed Cathle» на «Expo-2010» в Шанхае и «Hive» на «Expo-2015» в Милане. Первый представляет собой округлую полость, которая выпускает шестьдесят тысяч светящихся оптоволоконных трубок и колышет ими; второй – пружинистый куб, собранный вокруг светящейся сферы из 32 слоев редкой гексагональной сетки (рис. 7, 8).



Рис. 7. «Seed Cathle»,
Шанхай



Рис. 8. «Hive»,
Милан

Заключение

Если зафиксировать расположение всех географически разрозненных светопро-
странств, можно составить земную карту непрерывной виртуальной реальности. По
предположению П. Кейна, получится довольно сложный пазл, пульсирующий от
«удивления и неожиданностей, риска и инициативы, шанса и воображения; мир,
восприимчивый к нашим страстным намерениям, но и предъявляющий свои права,
требующий эволюции наших качеств и реакций» [17].

Стремление к виртуализации светопро-
странств необратимо. Его нельзя приостано-
вить, однако можно и нужно осмыслять. Сама стратегия развития светодизайна
должна включать в себя моменты превентивного информирования, просвещения
публики. Думается, прежде всего надо учить людей решительно отделять эмпири-
ческую реальность от виртуальной реальности, которая не уводит из действитель-
ности, а лишь дает повод увидеть ее многомерность, напоминает, что это не просто
место проживания, но часть мироздания.

Список литературы

1. Иконников, А.В. Архитектор – НОМО LUDENS / А.В. Иконников // Архитек-
тура мира: материалы конференции «Запад-Восток: Личность в истории архи-
тектуры». – Вып. 4. – М.: ARCHITECTURA, 1995. – С. 17–20.
2. Кутырев, В.Г. Сценарное проектирование малых светопро-
странств города / В.Г. Кутырев, А.М. Стеклов, М.М. Червяков // Современные проблемы науки и
образования. – 2015. – № 1. – Ч. 2. – URL: [https://www.science-education.ru/ru/
article/view?id=19973](https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19973) (30.01.2020).
3. Соловьев, В.С. Общий смысл искусства / В.С. Соловьев // Философия искусства
и литературная критика. – М.: Искусство, 1991. – С. 73–89.
4. Линч, К. Образ города / К. Линч. – URL: [http://www.glazychev.ru/books/
translations/Lynch/Lynch_Image_of_the_city/Lynch_Image_of_the_city_2.htm](http://www.glazychev.ru/books/translations/Lynch/Lynch_Image_of_the_city/Lynch_Image_of_the_city_2.htm)
(30.01.2020).
5. Асанович, А. Компьютерные средства и эволюция методологии архитектурного
проектирования: автореф. дис. ... д-ра архитектуры / А. Асанович. – М.: МАрХИ,
2007. – 40 с.
6. Хоружий, С.С. Род или недород? Заметки к онтологии виртуальности / С.С. Хо-
ружий // Вопросы философии. – 1997. – № 6. – С. 53–68.
7. Мурина, Е.Б. Проблемы синтеза пространственных искусств / Е.Б. Мурина. – М.:
Искусство, 1982. – 191 с.
8. Гутман, И.Е. Компьютерные виртуальные игры: автореф. дис. ... канд. филос.
наук / И.Е. Гутман. – СПб.: СПбГУ, 2009. – 24 с.

9. Новикова, О.Н. Деконструкция бытия человека в контексте игроизации современной культуры / О.Н. Новикова. – Екатеринбург: УГЛУ, 2017. – 90 с.
10. Кулагина, И.В. Виртуальность как инвариант социокультурной реальности: методологические основания социальных исследований: дис. ... канд. филос. наук / И.В. Кулагина. – Томск: ТГУ, 2004. – 134 с.
11. Бычков, В.В. Виртуальная реальность как феномен современного искусства / В.В. Бычков, Н.Б. Маньковская // Эстетика: Вчера. Сегодня. Всегда. Вып. 2. – М.: ИФ РАН, 2006. С. 32–60.
12. Иванов, А.Е. Виртуальная реальность // История философии. Энциклопедия. – Минск, 2002, – С. 183.
13. Иванов, Д.В. Виртуализация общества / Д.В. Иванов. – СПб.: Петербургское Востоковедение, 2000. – 96 с.
14. Яцюк, О.Г. Мультимедийные технологии в проектной культуре дизайна: гуманитарный аспект: автореф. дис. ... д-ра искусствоведения / О.Г. Яцюк. – М.: НИИТЭ, 2009. – 46 с.
15. Добрицына, И.А. От постмодернизма к нелинейной архитектуре. Архитектура в контексте современной философии и науки: автореф. дис. ... д-ра архитектуры / И.А. Добрицына. – М.: НИИТАГ РААСН, 2007. – с. 50.
16. Вытулева, К.О. Пространственные эксперименты в новейшей архитектуре. К вопросу о «новых образах»: автореф. дис. ... канд. искусствоведения / К.О. Вытулева. – М.: МГУ, 2009. – 24 с.
17. Воскоян, М.В. Философия игры и реальность / М.В. Воскоян; Институт динамического консерватизма. – URL: [http://www.dynacon.ru/content/articles_idk/363/\(30.01.2020\)](http://www.dynacon.ru/content/articles_idk/363/(30.01.2020)).

References

1. Ikonnikov, A.V. Architect – HOMO LUDENS / A.V. Ikonnikov. // Architecture of the world. Materials of the conference «West-East: Person in history of architecture». – Iss. 4. – Moscow: ARCHITECTURA, 1995. – P. 17–20.
2. Kutyrev, V.G. Scenario design of small light spaces of the city / V.G. Kutyrev, A.M. Steklov, M.M. Cherviakov // Modern problems of science and education. – 2015. – № 1. – Part 2. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19973> (30.01.2020).
3. Solovyev, V.S. General sense of art / V.S. Solovyev // Philosophy of art and literary criticism. – М.: Art, 1991. – P. 73–89.
4. Lynch, C. The Image of the City / C. Lynch. – URL: http://www.glazychev.ru/books/translations/Lynch/Lynch_Image_of_the_city/Lynch_Image_of_the_city_2.htm (30.01.2020).
5. Asanovich, A. Computer means and evolution of the architecture design methodology: Abstract of thesis on the Doctor of Architecture / A. Asanovich. – М.: Moscow Architectural Institute, 2007. – 40 p.
6. Khoruzhiy, S.S. Genus or ungenus? Notes to ontology of virtuality / S.S. Khoruzhiy // Problems of philosophy. – 1997. – № 6. – P. 53–68.
7. Murina, E.B. Problems of synthesis of spatial arts / E.B. Murina. – М.: Art, 1982. – 191 p.
8. Gutman, I.E. Computer virtual games: Abstract of thesis on the Candidate of philosopher / I.E. Gutman. – St. Petersburg: SPbSU, 2009. – 24 p.
9. Novikova, O.N. Deconstruction of human existence in the context of modern culture gambling / O.N. Novikova. – Ekaterinburg: Ural State Forestry Engineering University, 2017. – 90 p.
10. Kulagina, I.V. Virtuality as an Invariant of the Sociocultural Reality: Methodological Bases of Social Research: Abstract of thesis on the Candidate of philosopher / I.V. Kulagina. – Tomsk: TSU, 2004. – 134 p.

-
11. Bychkov, V.V. Virtual reality as a phenomenon of modern art / V.V. Bychkov, N.B. Mankovskaya // *Aesthetics: Yesterday. Today. 2.* – M.: Institute of Philosophy of the Russian Academy of Sciences, 2006. – P. 32–60.
12. Ivanov, A.E. Virtual Reality / A.E. Ivanov // *History of Philosophy. Encyclopedia.* – Minsk, 2002, – P. 183.
13. Ivanov, D.V. Virtualization of Society / D.V. Ivanov. – St. Petersburg: Petersburg Oriental Studies, 2000. – 96 p.
14. Yatsyuk, O.G. Multimedia technologies in design culture of design: humanitarian aspect: Abstract of thesis on the Doctor of Art History / O.G. Yatsyuk. – M.: Scientific Research Institute of Technical Aesthetics, 2009. – 46 p.
15. Dobritsyna, I.A. From postmodernism to nonlinear architecture. Architecture in the Context of Modern Philosophy and Science: Abstract of thesis on the Doctor of Architecture / I.A. Dobritsyna. – Moscow: Research Institute of Architecture and Urban Planning Theory of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, 2007. – 50 p.
16. Vytuleva, K.O. Spatial experiments in modern architecture. To the question of «new images»: Abstract of thesis on the Candidate of Art History / K.O. Vytuleva. – M.: MSU, 2009. – 24 p.
17. Voskonyan, M.V. Philosophy of Game and Reality / M.V. Voskonyan; Institute of Dynamic Conservatism. – URL: http://www.dynacon.ru/content/articles_idk/363/ (30.01.2020).