

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 3 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,
В.С. Кулакова,
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 13.11.2013.
Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд.л. 22,75. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 214.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

3(17)/2013

Содержание

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ** 4

Селяев В.П., Лукин А.Н., Колотушкин А.В.
**ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ
ДЛЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ**..... 4

Королев Е.В.
**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ** 9

Иноземцев С.С., Гришина А.Н., Королев Е.В.
**МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО
НАНОРАЗМЕРНОГО МОДИФИКАТОРА
ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ** 15

**Калашников В.И., Тараканов О.В., Белякова
Е.А., Мороз М.Н.**
**НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЗОЛ ТЭЦ В ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАН-
НЫХ БЕТОНАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ** 22

Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В.
**АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩЕГО КОМПОЗИТА** 28

Ерофеев В.Т., Родин А.И.
**БИОСТОЙКОСТЬ ДЕКОРАТИВНЫХ
ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ** 32

Федорцов А.П., Федорцов В.А.
**О ПОТЕНЦИАЛЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА
И ЕГО ИЗМЕНЕНИИ** 39

Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В.
**ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ,
ЭФФЕКТИВНО РАБОТАЮЩИЕ В ШИРОКОМ
ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР**..... 46

Ерошкина Н.А., Коровкин М.О.
**МЕХАНИЗМ ТВЕРДЕНИЯ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ
ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ МАГМАТИЧЕСКИХ
ГОРНЫХ ПОРОД** 50

Мышкин А.В., Ерофеев В.Т.
**ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ
ПОЛИЭФИРАКРИЛАТНЫХ КОМПОЗИТОВ**.... 56

Фокин Г.А., Гуськов А.С.
**УСКОРЕНИЕ РЕАКЦИИ ТВЕРДЕНИЯ
ВЯЖУЩЕГО НИЗКОЧАСТОТНЫМ
УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПОЛЕМ**..... 62

© Авторы публикаций, 2013
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2013
© ПГУАС, 2013

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	67	Комаров В.А., Болдырева О.В., Жуков А.Н. КОНСОЛЬНЫЕ ОПОРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РИГЕЛЕЙ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СИЛ И ОПОРНОГО ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА.....	128
Селяев В.П., Соловьев А.А., Парамонов Р.Н., Алимов М.Ф., Шабасв И.Н. РАБОТА БАЛОК, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ.....	67	Андреев С.Ю., Камбург В.Г., Петрунин А.А., Князев В.В., Давыдов Г.П. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕ- ДАЧИ ИЗ ВСПЛЫВАЮЩИХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....	134
Скачков Ю.П., Снежкина О.В., Кочеткова М.В., Корнюхин А.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМ РАЗРУШЕНИЯ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ КОРОТКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ.....	74	Береговой А.М., Мальцев А.В., Дерина М.А., Гречишкин А.В. ЭФФЕКТ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ ИНФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ НАРУЖНУЮ СТЕНУ.....	140
Туманов В.А., Абрашитов В.С., Туманов А.В., Абрашитов Н.В. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОДСТРО- ПИЛЬНОЙ СТАЛЬНОЙ ФЕРМЫ ПРОЛЕТОМ 12 М.....	82	Королева Т.И., Грейсх Г.И., Степанов С.А., Иващенко Н.Ю. НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА В ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ (НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ) ..	145
Нежданов К.К., Антонов С.А. КОНСТРУКЦИЯ СПИРАЛЬНОГО ВИАДУКА	86	Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ НАСТРОЙКЕ ИМИТАТОРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	150
Нежданов К.К., Кузьмишкин А.А., Гарькин И.Н. ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХСТЕНЧАТЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С АМОРТИЗИ- РУЮЩИМ ЭФФЕКТОМ	91	Боровков Д.П., Бурба И.В., Чичиров К.О. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ НА ВСТРЕЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ.....	157
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ	95	АРХИТЕКТУРА.....	164
Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРИЛОЖЕНИЯХ	95	Елькина О.В., Дмитриева Н.Н. СИНЕРГИЯ ИСТОРИЧЕСКИ СЛОЖИВШЕГОСЯ АРХИТЕКТУРНОГО ЦЕНТРА В СИНЕРГЕТИКЕ ГОРОДА.....	164
Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Сколубович А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЯ СОРБЦИОННЫХ ФИЛЬ- ТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛО- ГИЯХ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ ВОД	101	Борисов С.В. ТРАДИЦИОННЫЕ ПЛАНИРОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРАВОСЛАВНЫХ ПРИХОД- СКИХ ХРАМОВ: АКТУАЛЬНОСТЬ СОВРЕМЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ.....	168
Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Полубояринов П.А., Давыдов Г.П., Князев В.А. НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕДВАРИ- ТЕЛЬНОЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД	107	ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ	174
Иванченко В.Т., Петриченко А.Н. СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ЗДАНИЙ УСАДЕБНОГО ТИПА	114	Куимова Е.И., Логанина В.И., Учаева Т.В. ВЫБОР ПОСТАВЩИКА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ.....	174
Гришин Б.М., Андреев С.Ю., Салмин С.М. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУПНОЗЕРНИСТОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАГРУЗКИ ПРИ ФИЛЬТРОВАНИИ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ	121	Указатель статей, опубликованных в 2013 г.....	179

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.. 4	ENGINEERING SYSTEMS95
Selyaev V.P., Lukin A.N., Kolotushkin A.V. CEMENT COMPOSITIONS FOR HIGH-STRENGTH CONCRETE 4	Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. DECOMPOSITION OF DYNAMIC SYSTEMS IN APPLICATIONS.....95
Korolev E.V. ADVANCED BUILDING MATERIALS: ECONOMIC EFFICIENCY 9	Skolubovich Yu.L., Voitov E.L., Skolubovich A.Yu. SORPTION FILTER MATERIALS IN NATURAL WATER TREATMENT TECHNOLOGIES..... 101
Inozemcev S.S., Grishina A.N., Korolev E.V. MODEL OF NANOMODIFIER FOR CONCRETE 15	Andreev S.Yu., Garkina I.A., Poluboyarinov P.A., Davydov G.P., Knyazev V.A. NEW TECHNOLOGY OF PRELIMINARY PHYSICO-CHEMICAL WASTE WATER PURIFICATION107
Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Moroz M.N. NEW USES OF THERMAL POWERSTATION FLY ASH IN POWDER-ACTIVATED CONCRETE OF NEW GENERATION 22	Ivanchenko V.T., Petrichenko A.N. ENERGY SUPPLY SYSTEMS OF AUTONOMOUS ENERGY-EFFICIENT FARMHOUSE..... 114
Cherkasov V.D., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V. DAMPING COMPOSITE MATERIAL: DESIGN OF STRUCTURE 28	Grishin B. M., Andreev S. Yu., Salmin S. M. CONFORMITIES OF LARGE GRANULAR CONTACT LOAD HYDRAULIC RESISTANCE CHANGE UNDER WATER SUSPENSION FILTRATION 121
Yerofeev V.T., Rodin A.I. BIOLOGICAL STABILITY OF DECORATIVE CEMENT COMPOSITES 32	Komarov V.A., Boldyreva O.V., Zhukov A.N. REINFORCED GIRTH RAILS CONSOLE SUPPORTS AT JOINT ACTION OF VERTICAL FORCES AND BEARING BENDING MOMENT 128
Fedortsov A. P., Fedortsov V. A. ON POTENTIAL PROPERTIES OF A MATERIAL AND ITS CHANGES..... 39	Andreev S.Yu., Kamburg V.G., Petrunin A.A., Knyazev V.A., Davydov G. P. MATHEMATICAL MODELLING OF MASS TRANSFER PROCESSES KINETICS FROM FLOATING GAS BUBBLES IN WASTE WATER PURIFICATION TECHNOLOGIES 134
Cherkasov V.D., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V. DAMPING SHEETS WITH WIDE WORKING TEMPERATURE RANGE 46	Beregovoi A.M., Maltsev V.A., Derina M.A., Grechishkin A.V. ENERGY SAVING EFFECT IN THE ROOM WITH NATURAL VENTILATION IN CONDITIONS OF AIR INFILTRATION THROUGH EXTERNAL WALL 140
Eroshkina N.A., Korovkin M.O. STRUCTURE FORMATION MECHANISM OF GEOPOLYMER BINDERS, PREPARED ON THE BASIS OF CRUDED ROCK 50	Koroleva T.I., Greisukh G.I., Stepanov S.A., Ivashchenko N.Y. ALTERNATIVE ENERGY IN HEAT SUPPLY (ON THE EXAMPLE OF THE PENZA REGION)..... 145
Myshkin A.V., Yerofeev V.T. STRUCTURE OPTIMIZATION OF POLYESTERCRYLATE COMPOSITES..... 56	Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. APPROXIMATE METHODS OF DECOMPOSITION AT DYNAMIC SYSTEMS SIMULATORS CONFIGURATION 150
Fokin G.A., Guskov A.S. ACCELERATION OF BINDER HARDENING REACTION BY LOW-FREQUENCY ULTRASONIC FIELD..... 62	Borovkov D.P., Burba I.V., Chichirov K.O. EFFICIENCY PRECIPITATORS AT COUNTER CORKSCREW FLOW 157
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS..... 67	ARCHITECTURE 164
Selyaev V.P., Solovyev A.A., Paramonov R.N., Alimov M.F., Shabaev I.N. WORK OF CONCRETE BEAMS REINFORCED BY FIBERGLASS REINFORCEMENT 69	El'kina O.V., Dmitrieva N.N. SYNERGY OF THE HISTORICAL ARCHITECTURAL CENTER IN CITY SYNERGETICS 164
Skachkov Y.P., Snezhkina O.V., Kochetkova M.V., Kornuhin A.V. DETERMINATION OF DESTRUCTION AND CRACKING FORMATION SCHEMES OF SHORT REINFORCED CONCRETE BEAMS ACCORDING TO EXPERIMENTAL DATA 74	Borisov S.V. TRADITIONAL PLANNING SOLUTIONS OF ORTHODOX PARISH CHURCHES: THE RELEVANCE OF MODERN APPLICATIONS 168
Tumanov V.A., Abrashitov V.S., Tumanov A.V., Abrashitov N.V. NATURAL TESTS OF NOTBEARING STEEL FARM WITH 12 M FLIGHT 82	ECONOMICS AND MANAGEMENT 174
Nezhdanov K.K., Antonov S.A. DESIGN OF A SPIRAL VIADUCT 86	Kuimova H.I., Loganina V.I., Uchaeva T.V. SUPPLIER SELECTION BASED ON THE FUZZY SETS THEORY 174
Nezhdanov K.K., Kuzmishkin A.A., Garkin I.N. APPLICATION OF TWO WEB CRANES BEAMS WITH SHOCK ABSORBING EFFECT 91	

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 666.972.1

*Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева*

Россия, 430000, г. Саранск,
ул. Советская, д. 24
тел.: (8342) 47-71-56

Селяев Владимир Павлович,
академик РААСН, доктор технических
наук, профессор, зав. кафедрой
«Строительные конструкции»
E-mail: ntorm80@mail.ru

Лукин Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: lan888@yandex.ru

Колотушкин Алексей Владимирович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: karlson1520@yandex.ru

*Mordovian State University
named after N.P. Ogarev*

Russia, 430000, Saransk, 24,
Soviet St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Seljaev Vladimir Pavlovich,
Academician of the Russian Academy
of Architectural and Construction Sciences,
Doctor of Science, Professor,
Head of the department «Building designs»
E-mail: ntorm80@mail.ru

Lukin Aleksandr Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: lan888@yandex.ru

Kolotushkin Aleksey Vladimirovich,
Postgraduate of the department «Building
designs»
E-mail: karlson1520@yandex.ru

ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

В.П. Селяев, А.Н. Лукин, А.В. Колотушкин

Приведены результаты исследований влияния поликарбоксилатных пластификаторов и микрокремнезёма на прочностные характеристики цементных композиций.

Ключевые слова: цементные композиции, микрокремнезём, суперпластификатор, предел прочности.

CEMENT COMPOSITIONS FOR HIGH-STRENGTH CONCRETE

V.P. Selyaev, A.N. Lukin, A.V. Kolotushkin

The results of researching the influence of polycarboxylate plasticizers and silica fume on cement compositions strength features are given.

Keywords: cement compositions, silica fume, superplasticizer, strength.

Благодаря своим превосходным свойствам – отличному соотношению прочности к объемной плотности, высокой плотности и долговечности – высокопрочный бетон все чаще используется для решения различных задач строительства.

В данной статье рассматривается подбор составов цементных композиций для высокопрочных бетонов. В качестве минеральных тонкодисперсных добавок применялись различные модификации микрокремнезёма, а также диоксид титана. Использо-

вание микрокремнезёма позволяет получать бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками. В составы вводились микрокремнезём уплотнённый МКУ-85 Челябинского металлургического комбината, тонкодисперсный осажденный диоксид кремния БС-100 производства ОАО «Сода», Аэросил А-300 Калужского опытно-экспериментального завода, а также микродисперсный кремнезём, полученный гелевым методом из природного диатомита Атемарского месторождения.

Обязательным условием при изготовлении высокопрочных бетонов является применение суперпластификаторов. Введение их в цементную композицию позволяет улучшить такие показатели, как прочность, долговечность, трещиностойкость, водонепроницаемость, морозостойкость и т.д.

Для проведения эксперимента изготавливались и испытывались образцы-балочки размером $2 \times 2 \times 7$ см. Испытания на прочность проходили через 7 суток после изготовления, образцы выдерживались в стандартных условиях.

Оптимизация составов цементных композиций для высокопрочных бетонов выполнялась с применением математических методов планирования эксперимента. Вяжущим компонентом выступал портландцемент марки М400 Д0. В качестве варьируемых факторов рассматривалось содержание МКУ-85 (X_1) и поликарбоксилатного суперпластификатора Хидетал-ГП-9γ (X_2).

Результаты эксперимента были обработаны при помощи программного комплекса FACTOR. Водоцементное отношение, равное 0,32, оставалось постоянным. Оптимизация проводилась по пределу прочности при сжатии (R_b) и растяжении при изгибе (R_{bt}). Матрица планирования и результаты эксперимента для составов с поликарбоксилатным суперпластификатором Хидетал-ГП-9γ приведены в табл. 1. После статистической обработки результатов эксперимента получены уравнения регрессии:

$$R_b = 58,669 + 1,931 \cdot X_1 - 3,002 \cdot X_2 - 1,801 \cdot X_1^2 - 1,052 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,109 \cdot X_2^2 - 0,463 \cdot X_1^4 + 0,024 \cdot X_1^2 \cdot X_2 - 1,857 \cdot X_1 \cdot X_2^2 - 3,754 \cdot X_2^4; \quad (1)$$

$$R_{bt} = 6,691 + 0,299 \cdot X_1 - 2,642 \cdot X_2 - 0,195 \cdot X_1^2 - 0,270 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,256 \cdot X_2^2 + 0,727 \cdot X_1^4 - 0,179 \cdot X_1^2 \cdot X_2 - 0,454 \cdot X_1 \cdot X_2^2 + 2,626 \cdot X_2^4. \quad (2)$$

По уравнениям построены графики зависимости пределов прочности от содержания МКУ-85 и поликарбоксилатного суперпластификатора Хидетал-ГП-9γ (см. рисунок).

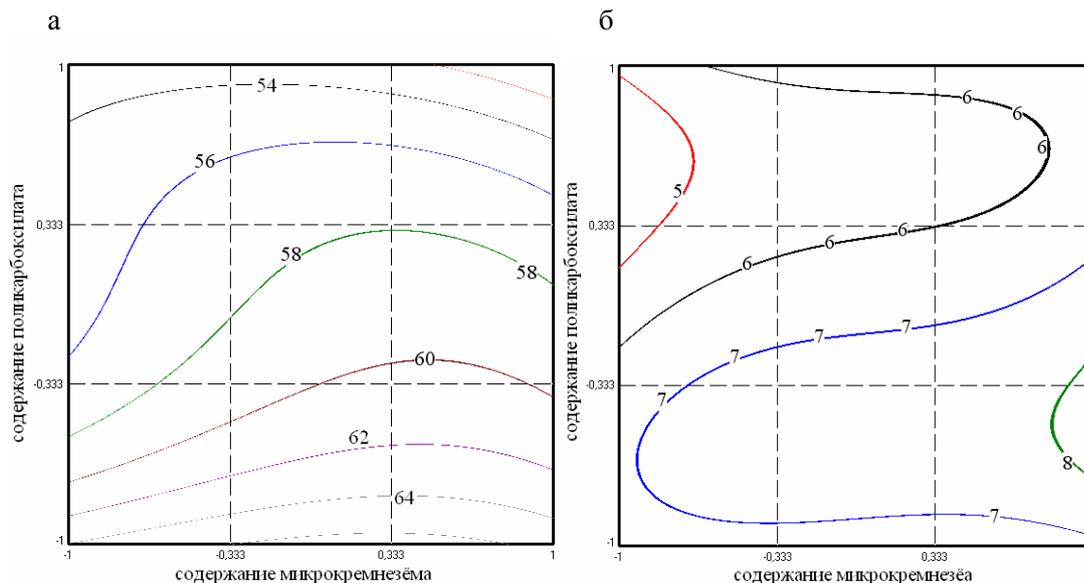
Т а б л и ц а 1

Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	Факторы варьирования				Прочность на сжатие R_b , МПа (7 суток)	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{bt}/R_b$
	Кодированные значения		Натуральные значения				
	X_1	X_2	X_1 – содержание МКУ-85, % от цемента	X_2 – содержание Хидетал-ГП-9γ, % от цемента			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	0	0,5	62,47	6,124	0,098
2	-1	-0,333	0	0,667	62,61	6,192	0,099
3	-1	0,333	0	0,833	48,73	5,122	0,105
4	-1	1	0	1	54,68	4,881	0,089
5	-0,333	-1	10	0,5	64,86	6,625	0,102
6	-0,333	-0,333	10	0,667	58,68	7,399	0,126
7	-0,333	0,333	10	0,833	58,25	5,224	0,090
8	-0,333	1	10	1	53,42	6,692	0,125
9	0,333	-1	15	0,5	68,59	6,525	0,095

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
10	0,333	-0,333	15	0,667	58,02	7,268	0,125
11	0,333	0,333	15	0,833	59,81	6,119	0,102
12	0,333	1	15	1	51,05	6,368	0,125
13	1	-1	20	0,5	66,16	6,498	0,098
14	1	-0,333	20	0,667	56,39	8,622	0,153
15	1	0,333	20	0,833	60,14	6,488	0,108
16	1	1	20	1	48,99	6,903	0,141



Зависимости изменения предела прочности при сжатии (а) и растяжении при изгибе (б) от содержания микрокремнезёма и поликарбоксилатного суперпластификатора Хидетал-ГП-9γ

Из рисунка видно, что повышение количества Хидетал-ГП-9γ более чем на 0,5 % от содержания цемента отрицательно сказывается на показателе предела прочности при сжатии. Максимум прочности при сжатии достигается при содержании уплотнённого микрокремнезёма в количестве 15 % от массы цемента ($X_1 = 0,333$) и поликарбоксилата Хидетал-ГП-9γ – 0,5 % от цемента ($X_2 = -1$).

Оптимум для предела прочности на растяжение при изгибе достигается соотношением 20 % МКУ-85 ($X_1 = 1$) и 0,667 % суперпластификатора Хидетал-ГП-9γ ($X_2 = -0,333$) от содержания цемента.

Для сравнения были использованы зарубежные суперпластификаторы серии Sika ViscoCrete. Это новое поколение высокоэффективных суперпластификаторов для производства пластичных бетонных смесей с высокой прочностью.

Вязущим компонентом в составах использовался цемент ПЦ-М500-Д0 ОАО «Мальцовский цементный завод», в качестве реакционно-химической добавки – различные типы микрокремнезёма. Также использовался диоксид титана TiO_2 , выступающий как микрозаполнитель.

Вид микрокремнезёма, как следует из результатов опыта, оказывает существенное влияние на прочностные характеристики бетона. Испытание особо чистых микрокремнеземов с чрезвычайно высокой дисперсностью не позволили получить таких же положительных результатов, как у уплотнённого микрокремнезёма МКУ-85. Смесей требовали повышенного количества воды при увеличении их содержания. Наибольшую прочность показал состав с содержанием МКУ-85 – 10 % и пластификатора Sika ViscoCrete 20 HE – 1 %, взятых от массы цемента. У этого состава прочность на сжатие составила 106,65 МПа, прочность на растяжение при изгибе – 14,736 МПа.

Т а б л и ц а 2

Прочностные показатели при содержании МКУ-85 – 10 % от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Содержание Sika ViscoCrete, % от массы цемента	Прочность на сжатие R_b , МПа (7 суток)	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{bt}/R_b$	Средняя плотность, г/см ³
0,24	20 HE	0,4	57,84	14,751	0,255	2,114
	25 RU		63,96	14,537	0,227	2,101
	5 New		79,86	11,632	0,146	2,144
	5 New ST		83,09	11,425	0,137	2,148
0,20	20 HE	1,0	106,65	14,736	0,138	2,323
	25 RU		96,05	13,021	0,136	2,258
	5 New		84,91	12,815	0,151	2,207
	5 New ST		81,18	10,161	0,125	2,214
0,20	20 HE	1,6	85,78	14,246	0,166	2,280
	25 RU		78,99	11,260	0,143	2,198
	5 New		72,74	12,080	0,168	2,165
	5 New ST		70,98	11,181	0,160	2,088

Т а б л и ц а 3

Прочностные показатели при содержании БС-100 – 3 % от массы цемента и содержании добавки Sika ViscoCrete – 1 % от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Прочность на сжатие R_b , МПа (7 суток)	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{bt}/R_b$	Средняя плотность, г/см ³
0,24	20 HE	86,06	14,289	0,166	2,083
	25 RU	77,95	11,745	0,151	2,105
	5 New	81,14	11,787	0,145	2,136
	5 New ST	65,95	9,357	0,142	2,078

Т а б л и ц а 4

Прочностные показатели при содержании Аэросил А-300 – 1 % от массы цемента и содержании добавки Sika ViscoCrete – 1 % от массы цемента.

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Прочность на сжатие R_b , МПа (7 суток)	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{bt}/R_b$	Средняя плотность, г/см ³
0,20	20 HE	74,00	12,724	0,172	2,116
	25 RU	74,46	11,411	0,153	2,097
	5 New	78,63	10,773	0,137	2,145
	5 New ST	78,68	11,075	0,141	2,096

Прочностные показатели при содержании микродисперсного кремнезёма из природного диатомита – 4 % от массы цемента и содержании добавки Sika ViscoCrete – 1 % от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Прочность на сжатие R_b , МПа (7 суток)	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{bt}/R_b$	Средняя плотность, г/см ³
0,25	20 HE	66,55	10,518	0,158	2,036
	25 RU	55,75	8,650	0,155	2,035
	5 New	57,40	7,969	0,139	2,011
	5 New ST	61,60	8,113	0,132	2,015

Т а б л и ц а 6

Прочностные показатели при содержании диоксида титана TiO₂ – 10 % от массы цемента и содержании добавки Sika ViscoCrete – 1 % от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Прочность на сжатие R_b , МПа (7 суток)	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{bt}/R_b$	Средняя плотность, г/см ³
0,18	20 HE	80,68	12,909	0,160	2,323
	25 RU	80,76	11,945	0,148	2,327
	5 New	66,37	11,252	0,170	2,292
	5 New ST	62,25	11,132	0,179	2,255

Данные эксперимента показали, что использование современных поликарбоксилатных суперпластификаторов в сочетании с микродисперсными добавками позволяет добиться: повышения прочности на сжатие до 100 МПа и выше, а также прочности на растяжение при изгибе до 15 МПа на 7-е сутки твердения; улучшения качества поверхности; сокращения трудо- и энергозатрат на производство, а значит, и снижения себестоимости.

Список литературы

1. Мещерин, В. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения / В. Мещерин // СтройПРОФИЛЬ. – 2008. – № 8. – С. 32–35.
2. Касторных, Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы: учебно-справочное пособие / Л.И. Касторных. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 221 с.
3. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны: моногр. / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.

References

1. Meshcherin, V. High-strength and heavy-duty concrete: the production technology and the application / V. Meshcherin // StroyPROFIL. – 2008. – № 8. – P. 32–35.
2. Kastornih, L.I. Additives for concrete and mortars: teaching handbook / L.I. Kastornih. – 2-nd ed. – Rostov-on-Don: Phoenix, 2007. – 221 p.
3. Bazhenov, Y.M. The modified high-quality concrete: research publication / Y.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. – M.: Publishing Association Building universities, 2006. – 368 p.

УДК 69.003.13

*Московский государственный
строительный университет*Россия, 129337, г.Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел./факс: +7 (495) 781-80-07**Королев Евгений Валерьевич**,
доктор технических наук, профессор,
проректор по учебной работе, директор
НОЦ «Нанотехнологии»
E-mail: korolev_ev@rambler.ru*Moscow State University of Civil Engineering*Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoe highway,
tel./fax: +7 (495) 781-80-07**Korolev Evgeniy Valeryevich**,
Doctor of Science, Professor,
vice rector for academic affairs, director of
research and education center
«Nanotechnology»
E-mail: korolev_ev@rambler.ru

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ*

Е.В. Королев

Сформулированы принципы обеспечения технико-экономической эффективности при разработке новых строительных материалов. Показано, что повышение технико-экономической эффективности строительных материалов может быть достигнуто не только улучшением их отдельных эксплуатационных свойств, но и расширением области применения материала. Сформулированы направления развития промышленности стройиндустрии и представлены виды перспективных строительных материалов.

Ключевые слова: технико-экономическая эффективность, критерий эффективности, качество, направления развития.

ADVANCED BUILDING MATERIALS: ECONOMIC EFFICIENCY

E.V. Korolev

The article is devoted to the discussion of methods which allow reaching the required level of economic efficiency of new construction materials. It is shown that to increase technical and economic efficiency of building materials either amount of the individual performance properties or expanding the areas of application of the material must be performed. The primary directions of the development of construction industry materials are formulated.

Keywords: economic efficiency, efficiency criterion, quality, direction of the development.

Перспективы развития строительства, ожидаемые предпочтения потребителей гражданского сектора позволяют предположить, что показатели конструкционных свойств широко применяемого строительного материала – бетона на цементном вяжущем – удовлетворительны. Такие бетоны обладают показателями, которые в совокупности с разработанными методиками проектирования зданий и сооружений обеспечивают их использование при возведении гражданских и промышленных объектов, инженерной и дорожной инфраструктуры. Это достаточно высокая прочность; развитая капиллярно-пористая структура, обеспечивающая при перепаде температур отвод конденсирующейся воды из ограждающих конструкций; приемлемая прочность сцепления с металлической арматурой; относительная долговечность, широта сырьевой базы: вяжущих, добавок, заполнителей и т.д. Важным фактором является также наличие апробированных методик проектирования конструкций, зданий и сооружений из этого материала, а также адекватная экспериментальная база по строительным конструкциям. Немаловажное значение имеют ожидания потребителей, их требования к зданиям и сооружениям, а следовательно, и к строительным материалам. Кроме того,

* Печатается при поддержке гранта Президента РФ МД-6090.2012.8.

необходимо учитывать готовность потребителей к внедрению новых материалов и возможность платить за их широкое применение.

Очевидно, что прогнозирование развития отрасли строительных материалов должно основываться на определении технологий, которые обеспечивали бы решение задач по устранению недостатков традиционных строительных материалов, что приведёт к расширению области их применения. Стратегия решения указанной задачи должна включать:

- 1) разработку способов повышения технико-экономической эффективности традиционных строительных материалов;
- 2) разработку новых материалов, лишенных недостатков традиционных материалов и дополняющих конструктивные решения.

Целевыми функциями для рассматриваемых способов являются *энергоэффективность технологий* и *безопасность материалов* в процессе эксплуатации. Эти функции могут быть оценены соответствующими критериями эффективности, демонстрирующими снижение как уровня потребляемой энергии и вещества на получение единицы продукции, так и сокращение эксплуатационных затрат, а также величиной предотвращенного ущерба здоровью человека. При прочих равных условиях эти критерии обобщены в *критерии технико-экономической эффективности* вида [1; 2]

$$k_{ef} = \left| \frac{\delta F}{\delta C} \right| \rightarrow \max, \quad (1)$$

где δF – относительное изменение качества материала,

$$\delta F = \frac{F_n - F_b}{F_b}, \quad (2)$$

(здесь F – обобщенный критерий качества; качество – совокупность свойств продукции, удовлетворяющих требованию потребителя); δC – относительное изменение цены материала,

$$\delta C = \frac{C_n - C_b}{C_b}, \quad (3)$$

где C – цена единицы продукции; индексами « b » и « n » обозначены базовый и новый материал (технология) соответственно.

Фактически предлагаемый критерий показывает стоимость увеличения качества материала на единицу продукции, т.е. оценку эффективности предлагаемых технологических решений по совершенствованию технологии или созданию новой технологии строительных материалов. Возможны следующие случаи изменения k_{ef} :

- 1) одновременное повышение качества и цены материала ($\delta F > 0, \delta C > 0$ (при $C_n > C_b$), $k_{ef} > 0$);
- 2) повышение качества материала при снижении его цены ($\delta F > 0, \delta C < 0$ (при $C_n < C_b$), $k_{ef} < 0$);
- 3) одновременное снижение цены и качества материала ($\delta F < 0, \delta C < 0$ (при $C_n < C_b$), $k_{ef} > 0$).

Установление этих условий важно для *классификации направлений совершенствования технологий материалов* и *оценки эффективности* предлагаемых технологических решений.

Вариант №1 демонстрирует ситуацию повышения качества с увеличением количества средств, затрачиваемых на совершенствование технологии. Важным является выполнение условия

$$\delta F > \delta C (k_{ef} > 1).$$

В этом случае наблюдается синергетический эффект, заключающийся в снижении затрат на повышение величины показателя свойства или расширение области применения материала (добавление нового свойства). Критерием является

$$k_1^{(1)} = \frac{C_n \left(\sum_{i=1}^m k_i \right)_b}{C_b \left(\sum_{i=1}^l k_i \right)_n} \rightarrow \min, \quad l \geq m, \quad (4)$$

где $k_i = I_i/I_c$; I_i, I_c – фактическое и контрольное значения свойства соответственно.

Вариант №2 демонстрирует повышение качества материала при снижении затрат, которое достигается оптимизацией технологического процесса производства. Очевидно, что он характеризует состояние технологии и степень ее совершенства (аналог X-эффективности в экономике [3]). Предположим, что кинетика изменения величин δF и δC описывается функциями вида

$$\delta F(t) = \frac{\delta F(0)}{1 + \exp(a_1 t)} \quad \text{и} \quad \delta C(t) = \left| \frac{\delta C(0)}{1 + \exp(a_2 t)} \right|, \quad (5)$$

где a_i – коэффициенты; t – время.

Тогда кинетика изменения критерия технико-экономической эффективности будет описываться функцией

$$k_{ef}(t) = k_{ef}(0) \frac{1 + \exp(a_2 t)}{1 + \exp(a_1 t)}. \quad (6)$$

Анализ формулы (6) показывает, что повышение значений $k_{ef}(t)$ обеспечивается только при условии $a_2/a_1 > 1$, указывающем на необходимость поиска технологических решений, обеспечивающих более интенсивное снижение стоимости материала по сравнению с кинетикой повышения его качества (рис.1 и 2).

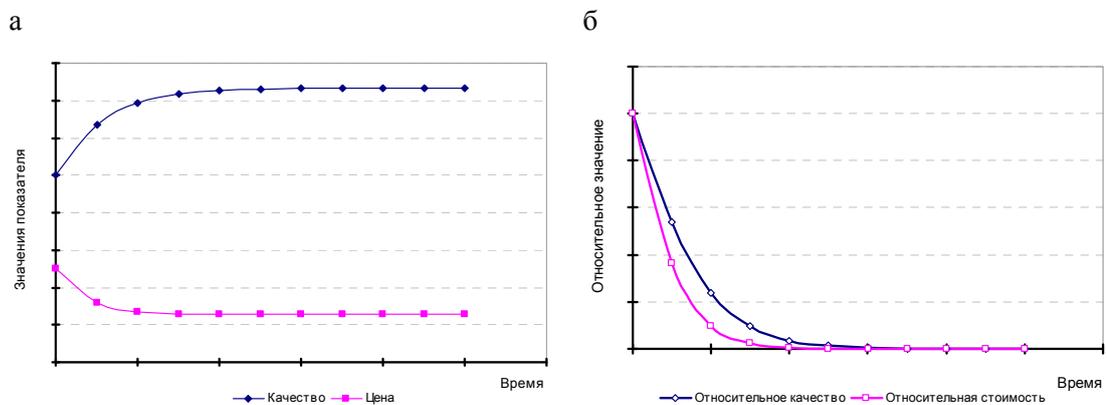


Рис. 1. Кинетика изменения абсолютных (а) и относительных (б) показателей качества и цены материала

Частными случаями варианта №2 являются:

- снижение цены материала при сохранении или незначительном повышении его качества ($\delta F = 0, \delta C < 0$ (при $C_n < C_b$), $k_{ef} < 0$);
- повышение качества материала при сохранении или незначительном изменении его цены ($\delta F > 0, \delta C = 0$ (при $C_n \approx C_b$), $k_{ef} \approx \delta F$).

Оценку их влияния на $k_{ef}(t)$ можно учесть введением соответствующего постоянного коэффициента (при $\delta F = 0$):

$$[k_{ef}(t)]_F = k_{ef}(0)(1 + \exp(a_2 t)). \quad (7)$$

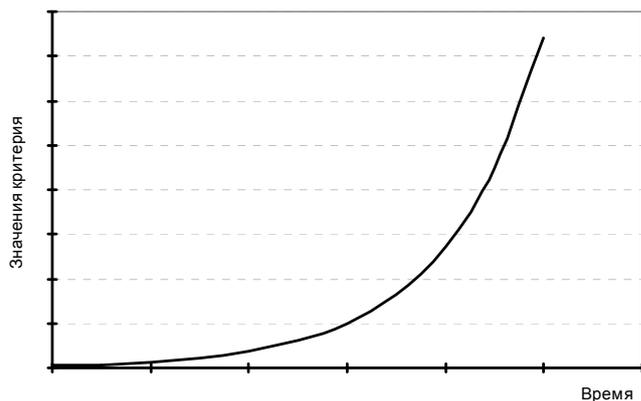


Рис.2. Кинетика изменения критерия технико-экономической эффективности

При $\delta C = 0$ применение формулы (1) невозможно. Однако очевидно, что изменение критерия технико-экономической эффективности пропорционально повышению качества материала, поэтому можно записать:

$$\left[k_{ef}(t_{i+1}) \right]_C = k_{ef}(t_i) + \delta F(t_i). \quad (8)$$

Вариант №3 характеризует случай снижения качества материала при уменьшении его цены, возникающий при замене компонента(ов) или уменьшении энергетических технологических затрат. В общем случае снижение качества материала недопустимо (для обоснования снижения величины δF необходимо введение нижних границ качества). Но при допустимости снижения качества материала критерием для оценки эффективности принятых технологических решений является критерий, рассчитываемый по формуле (4), из которого следует, что для обеспечения минимизации значения $k_1^{(1)}$ должно выполняться условие

$$\frac{C_n}{C_b} > \frac{\left(\sum_{i=1}^m k_i \right)_b}{\left(\sum_{i=1}^l k_i \right)_n}.$$

С учетом формул (2), (3) и условия варианта №3 можно записать:

$$k_1^{(1)} = \frac{1 - \delta C}{1 - \delta F},$$

из чего следует

$$|\delta C| > |\delta F|.$$

Проведем оценку возможности повышения показателя качества материала. Для этого рассмотрим два варианта:

1) сохранение общего числа показателей, характеризующих качество материала, но повышение значений отдельных частных критериев;

2) увеличение числа свойств, характеризующих качество материала.

Первый вариант характеризует эффективность усилий исследователей по увеличению величин свойств, а второй – по расширению области применения материала. Очевидно, что технологические приемы достижения результатов по этим вариантам инвариантны. Это могут быть традиционные способы, основанные на использовании более эффективных комплексов добавок, или применение современных приемов, например, нанотехнологии.

Качество продукции является интегральным показателем, рассчитываемым по обобщенному критерию различного вида. В ряде работ предложен обобщенный критерий вида

$$F = \sum_{i=1}^m \alpha_i \sqrt[n_i]{\prod_{j=1}^{n_i} k_j}, \quad (9)$$

где α_i – коэффициенты весомости ($\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$); $\sqrt[n_i]{\prod_{j=1}^{n_i} k_j}$ – группа частных критериев, объединенных в соответствие с принятой классификацией (например, физико-механические, теплофизические свойства и т.д.).

Как правило, усилия исследователей часто направлены на увеличение величин показателей только некоторых свойств. Это закономерно изменяет значение обобщенного критерия F , однако величина этого изменения зависит от перечня свойств, как изменяющихся при использовании предлагаемых рецептурных и технологических решений, так определяющих качество материала.

Предположим, что рецептурно-технологические решения приводят к изменению показателя свойства в a раз, т.е.

$$I = aI_c, \quad a > 1.$$

При $i > 1$ и $n_i > 2$ относительное изменение F равно [4]

$$\chi = \frac{F - F_0}{F_0} = \alpha \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n k_j} - 1 \right), \quad (10)$$

где индекс «0» обозначает значение обобщенного критерия качества материала до применения приемов новых решений.

При $l \leq n$ (здесь l – количество свойств, показатели которых увеличиваются вследствие применения новых рецептурно-технологических решений; $n > 3$) и $\alpha \in I[0,1; 0,5]$ справедливы следующие заключения:

1) значения относительного изменения обобщенного критерия качества χ имеют невысокие значения (в рассмотренном варианте не превышает 30 %). При разработке новых рецептурно-технологических решений целесообразно повышать свойства, определяющие область его применения, т.е. являющиеся для оптимизируемого материала главными (коэффициент весомости для данной группы свойств является максимальным);

2) воздействие рецептурно-технологических решений должно распространяться на несколько свойств. В противном случае достижение, выявленное на некотором свойстве, будет нивелировано.

Альтернативой повышения величин свойств материала является расширение области его применения (вариант №2). В первом приближении представим δF в виде

$$\delta F = \frac{\sqrt[n+1]{\prod_{i=1}^{n+1} k_i}}{\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n k_i}} - 1 = k_{n+1} - 1. \quad (11)$$

Отсюда очевидно, что при $k_{n+1} > 1 \Rightarrow \delta F > 0$.

На основе сформулированных принципов обеспечения технико-экономической эффективности рациональными направлениями развития промышленности строительных материалов являются:

1) По направлению «**Энергоэффективность**»:

– *конструкционные легкие материалы* – материалы с низкой средней плотностью, обладающие требуемой конструкционной прочностью;

– *композиционные вяжущие вещества* – гидравлические вяжущие, содержащие комплекс минеральных и органоминеральных компонентов, в том числе из отходов промышленности, повышающих долговечность материалов;

- *полимерные композиционные материалы* – материалы на основе термопластов и реактопластов с повышенной тепло-, термо- и атмосферостойкостью.
 - *цементные вяжущие* на основе многотоннажных отходов промышленности, применяемые в неответственных конструкциях;
 - *комплексы добавок*, обеспечивающих повышение качества и снижение энергоёмкости продукции;
 - *композиционная арматура* – технологическая арматура, изготовленная из неметаллических компонентов;
 - *добавки-адгезивы* – вещества, повышающие прочность сцепления арматуры с бетоном и/или с заполнителем;
 - *добавки-демпферы* – вещества, обеспечивающие снижение внутренних напряжений и блокирование протекания коррозионных процессов на границе раздела «матричный материал – дисперсная фаза».
- 2) По направлению «**Безопасность**»:
- *биостойкие материалы* – материалы, ингибирующие процессы жизнедеятельности микроорганизмов;
 - *радиобезопасные материалы* – материалы, предотвращающие эмиссию радона в помещения;
 - *трещиностойкие материалы* – материалы, обладающие повышенным коэффициентом трещиностойкости (коэффициентом интенсивности напряжений первого рода).
- 3) По направлению «**Материалы-преобразователи и декоративные покрытия**»:
- *материалы с регулируемым декоративными характеристиками* – материалы, способные к изменению цветовой гаммы (и рисунка) в зависимости от освещённости и предпочтений потребителя;
 - *теплоизлучающие материалы* – материалы, преобразующие электричество в тепловую энергию;
 - *теплогенерирующие материалы* – материалы, преобразующую механическую нагрузку в тепловую энергию;
 - материалы, обладающие *фотокаталитической активностью* и обеспечивающие снижение уровня загрязнения воздуха;
 - материалы, обеспечивающие создание покрытий с *регулируемой фильностью*.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Техничко-экономические основы практической нанотехнологии в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2008. – №2(5). – С. 3–9.
2. Баженов, Ю.М. Оценка технико-экономической эффективности нанотехнологий в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2009. – №6. – С. 66–67.
3. Leibenstein, H. Allocative Efficiency and X-Efficiency / H. Leibenstein // The American Economic Review. – 56 (1966) – P. 392–415.
4. Королев, Е.В. Оценка эффективности технологии наномодифицирования серных вяжущих веществ по показателям эксплуатационных свойств / Е.В. Королев, Д.Г. Киселев, А.И. Альбакасов // Интернет-журнал «Нанотехнологии в строительстве». – 2013. – №3(25). – С.60–70.

References

1. Bazhenov, Yu.M. Technical and economic bases of applied nanotechnology in material science / Yu.M. Bazhenov, E.V. Korolev // Regional Architecture and Construction. – 2008. – № 2(5). – P. 3–9.
2. Bazhenov, Yu.M. Estimation of technical and economic efficiency of nanotechnology in material science / Yu.M. Bazhenov, E.V. Korolev // Building Materials. – 2009. – №6. – P. 66–67.
3. Leibenstein, H. Allocative Efficiency and X-Efficiency / H. Leibenstein // The American Economic Review. – 56 (1966) – P. 392–415.
4. Korolev, E.V. Estimation of efficiency of nanomodification technology of sulfur binders using values of operational properties / E.V. Korolev, D.G. Kiselev, A.I. Albakasov // Nanotechnology in Construction: Scientific Internet Journal. – 2013. – №3(25). – P.60–70.

УДК 69.003.13

*Московский государственный
строительный университет*Россия, 129337, г.Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел./факс: +7 (495) 781-80-07**Иноземцев Сергей Сергеевич,**
инженер-испытатель НОЦ
«Нанотехнологии»
E-mail: InozemcevSS@mgsu.ru**Гришина Анна Николаевна,**
кандидат технических наук, младший
научный сотрудник НОЦ
«Нанотехнологии»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru**Королев Евгений Валерьевич,**
доктор технических наук, профессор,
советник РААСН, проректор по учебной
работе, директор НОЦ «Нанотехнологии»
E-mail: korolev_ev@rambler.ru*Moscow State University of Civil Engineering*Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoe highway,
tel./fax: +7 (495) 781-80-07**Inozemcev Sergey Sergeevich,**
Engineer of the Scientific and Educational
Center «Nanotechnology»
E-mail: InozemcevSS@mgsu.ru**Grishina Anna Nikolaevna,**
Candidate of Sciences, Junior Researcher of
the Scientific and Educational Center
«Nanotechnology»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru**Korolev Evgeniy Valeryevich,**
Doctor of Science, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, vice rector for
academic affairs, director of research and
education center «Nanotechnology»
E-mail: korolev_ev@rambler.ru

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО НАНОРАЗМЕРНОГО МОДИФИКАТОРА ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ*

С.С. Иноземцев, А.Н. Гришина, Е.В. Королев

Представлена модель комплексного наноразмерного модификатора, состоящего из минерального носителя и активного компонента, обеспечивающего интенсификацию процесса сорбции легких фракций битума. Установлены граничные значения величин, определяющих эффективность модификатора для асфальтобетона. Показано, что для создания такого модификатора рационально использовать высокопористый минеральный компонент, на поверхность которого нанесен наноразмерный слой (менее 100 нм) активного компонента.

Ключевые слова: модель наномодификатора, асфальтобетон, наномодифицирование, капиллярное давление, наномодификатор, адсорбция, активный компонент, минеральный носитель.

MODEL OF NANOMODIFIER FOR BITUMINOUS CONCRETE

S.S. Inozemcev, A.N. Grishina, E.V. Korolev

Model of a complex nanomodifier consisting of a mineral carrier and adsorptionthe active component for corption of bituminous light fractions is given. Boundary values determining the efficiency of a modifier for asphalt concrete are established. It is shown that for making an effective modifier is rational to use highly porous mineral component with nanoscale active component (thickness < 100 nm) on the surface.

Keywords: model of nanomodifier, bituminous concrete, nanomodification, capillary pressure, nanomodifier, adsorptionthe active component, mineral carrier.

Качество дорожного покрытия определяется способностью асфальтобетона сопротивляться физико-механическим и климатическим воздействиям в период эксплуатации. Долговечность асфальтобетона зависит от его структуры, т.е. количества и распределения компонентов в объеме материала и интенсивности их взаимодействия.

* При поддержке гранта Президента РФ МД-6090.2012.8.

Распределение битума по поверхности минеральных компонентов, плотность упаковки минерального остова, сила сцепления битума с поверхностью зерен минеральных материалов и свойства компонентов оказывают влияние на параметры структуры асфальтобетона. Качество структуры асфальтобетона зависит от множества факторов, но, очевидно, что оно в большей степени определяется качеством вяжущего в тонких пленках, сформированных под влиянием поверхности зерен минеральных компонентов.

Известно, что потенциал сопротивления структуры материала эксплуатационным воздействиям [1...3] зависит от активности взаимодействия на границе раздела фаз «битум – наполнитель», так как на поверхности минерального компонента происходит структурирование битума, интенсивность которого определяется площадью поверхности контакта и адсорбционной способностью минерального компонента. Площадь поверхности минерального порошка составляет более 90 % общей площади поверхности частиц минеральных компонентов асфальтобетона; поэтому особое значение имеет характер взаимодействия этой поверхности с битумом.

При увеличении количества минерального порошка происходит уменьшение толщины битумных пленок на поверхности частиц, что при определенной концентрации приводит к резкому упрочнению контактов между зёрнами. Структурирование битума обеспечивает повышение плотности смеси, увеличение коэффициента внутреннего трения, повышение стойкости к сдвиговым, ударным нагрузкам, прочности при сжатии и снижение хрупкости. Также имеют большое значение характеристики наполнителя, влияющие на интенсивность и характер взаимодействия на границе раздела «битум – наполнитель», – размер и форма частиц, текстура поверхности и пористость.

Известно, что битум, в соответствии с мицеллярной теорией, представляется коллоидной системой, дисперсионной средой которой являются масляные фракции, а дисперсной фазой – асфальтены, окруженные оболочкой из смол. Таким образом, наиболее химически активные функциональные группы, входящие в состав смолисто-асфальтеновых комплексов, блокированы химически инертной масляной оболочкой [4, 5].

В результате взаимодействия битума с материалом, имеющим высокую удельную поверхность и тонкопористую структуру, происходит изменение группового состава битума за счет избирательной диффузии масел и смол внутрь материала, что приводит к изменению свойств битумных слоев на поверхности частиц и формированию на поверхности зерен прочных битумных пленок. В первом приближении можно записать, что указанный процесс подчиняется закону Пуазейля для цилиндрического капилляра [6]:

$$Q = \frac{(P_1 - P_0) \cdot \pi \cdot R_k^4}{8 \cdot \eta \cdot L_k},$$

где $P_1 - P_0 = \Delta P$ – перепад давления на концах капилляра, Па; Q – секундный объёмный расход жидкости, м³/с; R_k – радиус капилляра, м; η – коэффициент динамической вязкости, Па·с; L_k – длина капилляра, м.

Дополнительно предположим, что легкие фракции битума полностью смачивают поверхность материала минеральной части ($\theta = 0^\circ$, где θ – краевой угол смачивания), а перепад давления на концах капилляра определяется следующим образом:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R_k} \cos(\theta) - P_0,$$

где $\frac{2\sigma}{R_k} \cos(\theta)$ – капиллярное давление, в соответствии с законом Лапласа, Па;

σ – поверхностное натяжение легких фракций битума, Н/м; R_k – радиус капилляра, м; P_0 – атмосферное давление ($P_0 = 101325$ Па) [7].

Геометрические характеристики капилляра зависят от параметров порового пространства частицы минерального компонента и ее геометрических характеристик. Объем

пор (капилляров) можно представить как $V_{\Pi} = \varepsilon \pi \frac{d_f^3}{6}$, так и $V_{\Pi} = N_k \pi R_k^2 L_k$ (где ε – объемная доля пор; d_f – диаметр зерна минеральной части (носителя); N_k – количество капилляров; R_k, L_k – радиус и длина капилляра).

При предположении $L_k = \frac{d_f}{2}$ количество капилляров будет равно:

$$N_k = \frac{\varepsilon d_f^2}{3R_k^2}.$$

Для нахождения граничных значений диаметра частиц минерального компонента введем коэффициент (модуль открытой поверхности):

$$M_s = \frac{S_f}{V_f}.$$

При $S_f = \pi d_f^2 + 2N_k \pi R_k L_k$ и с учетом $L_k = \frac{d_f}{2}$, $V_f = \frac{\pi d_f^3}{6}$ модуль поверхности будет равен:

$$M_s = \frac{6}{d_f} + \frac{2\varepsilon}{R_k}.$$

Отсюда

$$d_f = \frac{6}{M_s - \frac{2\varepsilon}{R_k}}.$$

При $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$ максимальное значение модуля открытой поверхности равно:

$$M_{s,\max} = \frac{2\varepsilon_{\max}}{R_k},$$

тогда (рис. 1):

$$d_f = \frac{6R_k}{2(\varepsilon_{\max} - \varepsilon)}.$$

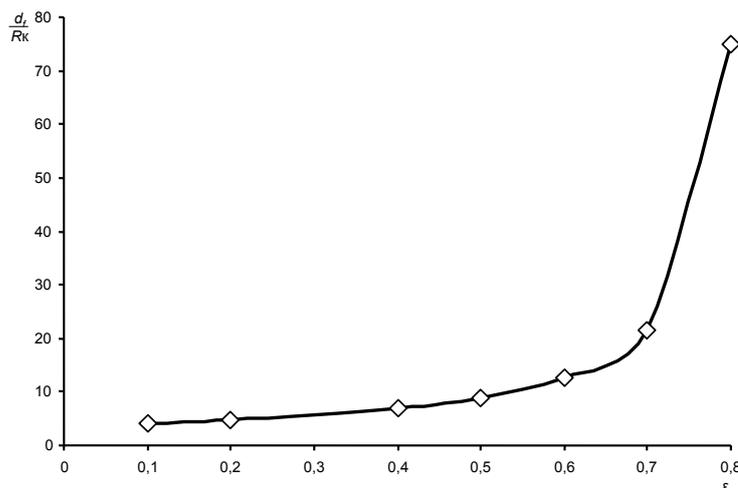


Рис. 1. Зависимость $\frac{d_f}{R_k} = f(\varepsilon)$

Из рис. 1 следует, что при использовании в технологии асфальтобетона плотных минеральных компонентов необходимо их существенное измельчение.

Уменьшение величин геометрических характеристик капилляров закономерно увеличивает величину Q . Практически реализовать такое изменение Q можно путем организации на поверхности минеральной части пористого слоя с характеристиками капилляра l_k и r_k . В этом случае формируется модификатор, состоящий из двух частей: активного компонента, ускоряющего процесс сорбции легких фракций битума, и минерального компонента, являющегося носителем активного компонента (рис. 2).

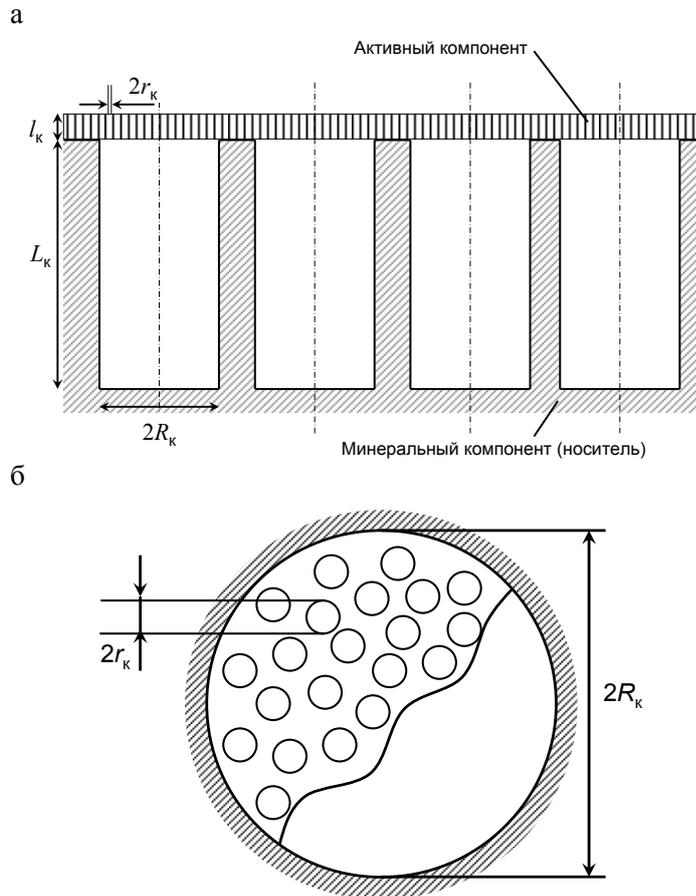


Рис. 2. Модель комплексного модификатора (а) и схема поверхности капилляра (б)
Очевидно, что критерием эффективности является условие

$$\frac{Q_n}{Q} \gg 1,$$

где Q_n – расход легких фракций, проходящих через капилляры активного компонента модификатора.

Величину Q_n запишем в виде:

$$Q_n = N_k^H \frac{\left(\frac{2\sigma \cos(\theta) - P_0}{r_k} \right) \cdot \pi \cdot r_k^4}{8 \cdot \eta \cdot l_k},$$

где N_k^H – количество капилляров, размещенных на площади, соответствующей сечению капилляра с диаметром $2R_k$ (см. рис. 2, б),

$$N_k^H = \varphi \left(\frac{R_k}{r_k} \right)^2;$$

здесь φ – плотность упаковки капилляров с диаметром r_k на поверхности.

Отсюда

$$\frac{Q_H}{Q} = \varphi \frac{\left(\frac{2\sigma}{r_k} \cos(\theta) - P_0 \right) \cdot L_k \cdot r_k^2}{\left(\frac{2\sigma}{R_k} \cos(\theta) - P_0 \right) \cdot l_k \cdot R_k^2}.$$

При введении коэффициентов $k_R = \frac{R_k}{r_k}$ и $k_L = \frac{L_k}{l_k}$ соотношение примет вид:

$$\frac{Q_H}{Q} = \varphi \frac{\left(\frac{2\sigma}{r_k} \cos(\theta) - P_0 \right)}{\left(\frac{2\sigma}{R_k} \cos(\theta) - P_0 \right)} \cdot \frac{k_L}{k_R^2} \quad \text{или} \quad \frac{Q_H}{Q} = \varphi \frac{\left(\frac{2\sigma}{r_k} \cos(\theta) - P_0 \right)}{\left(\frac{2\sigma}{r_k} \cos(\theta) - k_R P_0 \right)} \cdot \frac{k_L}{k_R}.$$

Установим граничные значения R_k, r_k, L_k, l_k модификатора. Значение R_k определим из равенства

$$\frac{2\sigma}{R_k} \cos(\theta) - P_0 = 0.$$

Тогда

$$R_k = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{P_0}.$$

При $\sigma = 0,0375$ Н/м, $P_0 = 101325$ Па $R_{k,\max} = 740$ нм. Значение $r_{k,\max}$ определится из уравнения

$$\frac{2\sigma}{r_k} \cos(\theta) - k_R P_0 = 0, \quad \text{следовательно,} \quad r_k = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{k_R P_0}.$$

Результаты расчета $r_{k,\max}$ представлены на рис. 3.

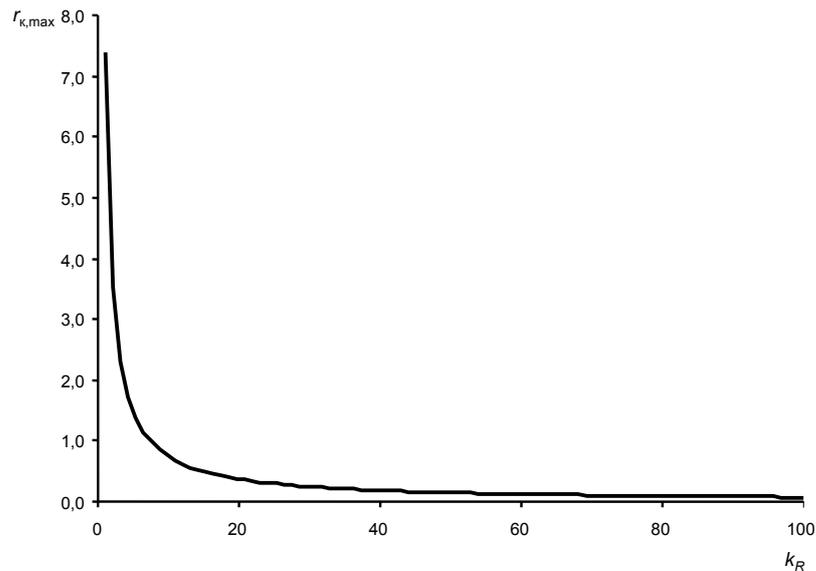


Рис. 3. Зависимость $r_{k,\max} = f(k_R)$ (при $\sigma = 0,0375$ Н/м, $P_0 = 101325$ Па)

Оценку толщины слоя активной части на поверхности минерального носителя l_k проведем при предположениях: $\frac{Q_{II}}{Q} = 1$; $k_R = 1$ и $k_L = \frac{L_k}{l_k} = \frac{d_f}{2l_k}$. Отсюда максимальная толщина слоя

$$l_{k, \max} = \frac{\varphi \cdot d_f}{2}.$$

Результаты расчета l_k при $\varphi \in I[0,52; 0,74]$ представлены на рис. 4.

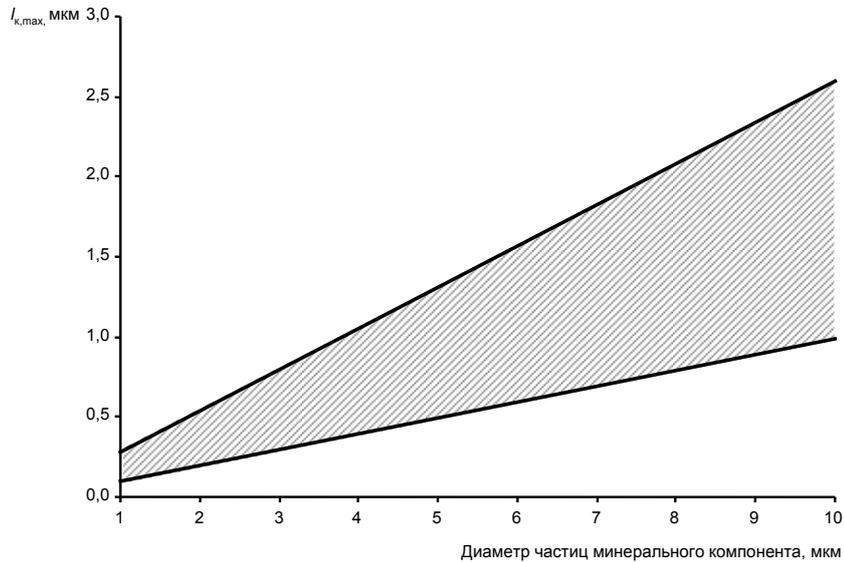


Рис. 4. Зависимость толщины слоя активного компонента $l_{k, \max}$ от диаметра частиц-носителя d_f

С учетом полученных граничных условий для модели комплексного модификатора можно определить предпочтительные параметры минеральных компонентов, используемых в качестве носителя активного компонента, а также его геометрические характеристики.

Предположим, что имеются два материала с одинаковым химическим составом (в этом случае $\theta = \text{const}$), но различной пористостью: $\varepsilon_1 = 0,75$ и $\varepsilon_2 = 0,3$. При $R_k = aR_{k, \max}$ ($a < 1$) максимальные диаметры частиц-носителя $d_{f1} = 4,29$ мкм и $d_{f2} = 4,11$ мкм. Отсюда $R_{k,1} = 6,78$ нм, $R_{k,2} = 4,11$ нм. Из рис. 5 следует, что значительное увеличение эффективности модификатора наблюдается только при толщине слоя активного компонента менее 100 нм.

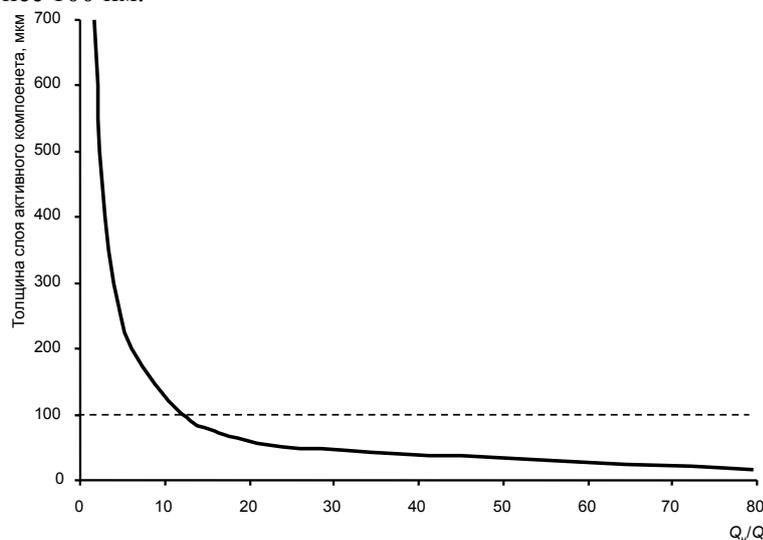


Рис. 5. Зависимость толщины слоя активного компонента от Q_{II}/Q

При условии, что $\frac{Q_{н}}{Q} = \text{const}$, $k_R = 1$ значения $k_{l,1} = 23,3$ и $k_{l,2} = 23,2$ (см. рис. 5)

соответствуют значениям толщины слоя активного компонента $l_{к,1} = 92$ нм и $l_{к,2} = 88$ нм. Анализ полученных результатов показывает, что для обеспечения заданной эффективности модификатору на основе минерального материала с меньшей пористостью требуется активация поверхности за счет более тонкого измельчения и нанесения более тонкого слоя активного компонента. Для модификатора на пористом минеральном порошке активный компонент оказывает меньшее влияние на процесс сорбции, поэтому его толщина может быть увеличена. Это позволяет организовать производство такого модификатора по менее энергозатратной технологии.

Таким образом, получение эффективного комплексного модификатора для асфальтобетона возможно при использовании минерального компонента с высокопористой структурой в качестве носителя, на поверхность которого нанесен активный компонент слоем толщиной менее 100 нм.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Модель деструкции и методика прогнозирования долговечности строительных композитов / Е.В. Королев, В.А. Береговой, А.Н. Бормотов, А.И. Еремкин // Труды международной конференции «Concrete durability: achievement and enhancement». – Англия, Шотландия, университет Данди. – С. 345-356.
2. Прошин, А.П. Выбор кинетической модели деструкции композиционных материалов. Параметры процесса / А.П. Прошин, Е.В. Королев, С.А. Болтышев, О.В. Королева // Известия вузов. Строительство. – 2005. – №3. – С. 32–36.
3. Гарькина, А.И. Выбор кинетической модели деструкции композиционных материалов. Параметры процесса / А.И. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Обзорные прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т.15. – Вып. 3. – С. 459–460.
4. Горнаев, Н.В. Взаимодействие битума с влажными минеральными материалами / Н.В. Горнаев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1967. – №12. – С. 137–139.
5. Гохман, Л.М. О роли органических вяжущих материалов в обеспечении работоспособности асфальтобетона / Л.М. Гохман // Автомобильные дороги. – 1987. – №7. – С. 21–23.
6. Вишневецкий, С.М. Пуазёйля Закон / С.М. Вишневецкий [и др.] // Физическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1988—1999.
7. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

References

1. Korolev, E.V. Model decomposition and forecasting technique durability of composites / E.V. Korolev, V.A. Beregovoy, A.N. Bormotov, A.I. Eremkin // Works of international conference «Concrete durability: achievement and enhancement» – England, Scotland, un. Dandy. – P. 345–356.
2. Proshin, A.P. Selection of kinetic model degradation composites. The process parameters / A.P. Proshin, E.V. Korolev, S.A. Boltyshev, O.V. Koroleva // News of Higher Educational Institutions. Construction. – 2005. – №3. – P. 32–36.
3. Garkina, A.I. Selection of kinetic model degradation composites. The process parameters / A.I. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Review of Applied and Industrial Mathematics. – 2008. – T.15. – Ed. 3. – P. 459–460.
4. Gornaev, N.V. Interaction of bitumen with wet mineral materials / N.V. Gornaev // Journal «News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture». – 1967. – №12. – P. 137–139.
5. Gohman, L.M. About the role of organic binders in providing efficiency asphalt / L.M. Gohman // «Highway» magazine (Avtomobilnye Dorogy). – 1987. – №7. – P. 21–23.
6. Vishnetskiy, S.M. Poiseuille's law / S.M. Vishnetskiy [etc.] // Encyclopedia of Physics. – M.: Soviet Encyclopedia, 1988–1999.
7. Physical values: Directory / A.P. Babichev [etc.]. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 1232 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

Калашников Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технология строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
советник РААСН, декан факультета
«Управление территориями», Почетный
строитель России, Почетный работник
высшего профессионального образования
E-mail: zigk@pguas.ru

Белякова Елена Александровна,
старший преподаватель кафедры «Кадастр
недвижимости и право»
E-mail: var_lena@mail.ru

Мороз Марина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: mn.moroz80@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

Kalashnikov Vladimir Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Technology
of building materials and wood processing»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser
of the Russian Academy of Architectural
and Construction Sciences, Head of the
department «Management of territories»,
Honorary builder of Russia, Honored Worker
of Higher Professional Education
E-mail: zigk@pguas.ru

Belyakova Elena Aleksandrovna,
Senior lecture of the department «Real estate
cadastre and law»
E-mail: var_lena@mail.ru

Moroz Marina Nicholaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technology of building
materials and wood processing»
E-mail: mn.moroz80@gmail.com

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛ ТЭЦ В ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ*

В.И. Калашников, О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, М.Н. Мороз

Изложен новый подход к механо-химической подготовке зол-уноса ТЭЦ для радикального повышения их химической активности в смеси с цементом. Показано, что при предлагаемой подготовке композиционное цементно-зольное вяжущее обеспечивает высокую прочность пластифицированных бетонов нового поколения.

Ключевые слова: зола-унос, тепловыделение, сроки схватывания, малоцементные бетоны, порошковая активация, прочность.

NEW USES OF THERMAL POWERSTATION FLY ASH IN POWDER-ACTIVATED CONCRETE OF NEW GENERATION

V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, M.N. Moroz

A new approach to mechanical and chemical preparation of thermal power station fly ash to radically improve its chemical activity in a mixture with cement. It is shown that the proposed preparation of composite cement-ash binder provides high strength plastic concrete of new generation.

Keywords: fly ash, heat, setting time, low cement concrete, powder activated, strength.

Проблема использования зол-уноса ТЭЦ от сжигания углей является чрезвычайно актуальной. Особенно это относится к золам-уноса, удовлетворяющим основному требованию для использования в бетонах: минимальному содержанию несгоревших

* Научно-исследовательская работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-3833.2012.8.

остатков, способствующих коррозии арматуры, и свободных пережженных оксидов кальция и магния (CaO и MgO), вызывающих саморазрушение бетона.

Эволюция производства бетона старого поколения с использованием золы-уноса ТЭЦ свидетельствует о возможности замены золой 20–30 % цемента без потери прочности. Золой-уноса в основном использовались и используются с естественной дисперсностью 1500–3000 $\text{см}^2/\text{г}$, предопрделяемой системой улавливания, т.е. циклонами и электрофильтрами. При этом в бетонах переходного поколения с суперпластификаторами, когда доля дисперсного компонента близка или равна доле цемента, не реализуется основное требование – повышение реологической активности дисперсного компонента, заменяющего цемент. В первом варианте суммарный объем дисперсной фазы практически не меняется, во втором – возрастает пропорционально количеству добавляемой к цементу золы. При этом в непластифицированных бетонах старого поколения содержание высококонцентрированной водно-цементно-минеральной дисперсии не увеличивается из-за высокой водопотребности золы. Поэтому даже самые эффективные суперпластификаторы (СП) и гиперпластификаторы (ГП) не в состоянии превратить бетоны с использованием малых количеств зол с дисперсностью до 2000–3000 $\text{см}^2/\text{г}$ в высокопрочные и сверхвысокопрочные бетоны нового поколения. Также невозможно получить малоцементные бетоны нового поколения [1], в том числе из самоуплотняющихся смесей, на цементно-зольных вяжущих с расходом цемента 120–250 $\text{кг}/\text{м}^3$ с прочностью 30–80 МПа.

Для исключения замедленного гашения оксидов кальция и магния в теле затвердевшего бетона, приводящего к деструктивным последствиям, необходимо золу-уноса ТЭЦ подвергнуть механической активации путем помола и повышения ее дисперсности. В этом случае разрушение более крупных зольных гранул, в которых находятся мелкие гранулы, приведет к обнажению пережженных частиц, к полному гашению CaO и MgO с увеличением объема пластичной, незатвердевшей бетонной смеси.

Особенностью высокодисперсных зол, подвергнутых помолу, является существенное повышение тепловыделения в первые минуты после затворения золы водой. При этом сроки схватывания цементно-зольных суспензий с суперпластификаторами существенно ускоряются, что не позволяет использовать данные суспензии в бетонных смесях из-за их низкой жизнеспособности.

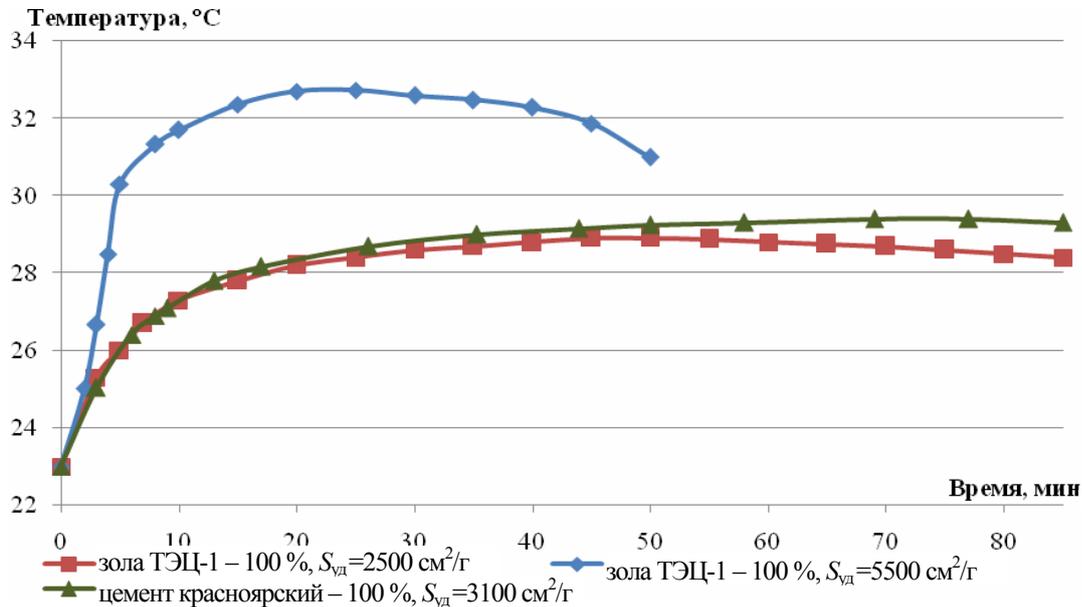
Для исследований использовали золы-уноса Красноярских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3. На рисунке показано тепловыделение тонкомолотой золы-уноса ТЭЦ-1, измельченной до удельной поверхности $S_{уд} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$, и исходной золы ($S_{уд} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$) в сравнении с портландцементом. Зола затворялась водой с суперпластификатором Melflux 5581 F. В результате интенсивного перемешивания в течение 3 мин была получена суспензия с распылом из конуса Хегерманна 35–40 см при $V/3=0,2$. Из рисунка следует, что температура гидратации тонкомолотой золы на 4 °С выше, чем исходной. Суспензия быстро загустевала: начало схватывания тонкомолотой золы составляло 5–7 мин, конец схватывания – 9–12 мин. Цементно-зольное вяжущее с использованием 30 % цемента и 70 % золы-уноса также обладало свойством быстрого схватывания и быстрого загустевания суспензии.

Одновременно изучали тепловыделение красноярского портландцемента М500 Д0, на котором изготавливали цементно-зольное вяжущее, в результате чего было обнаружено, что максимальная температура суспензии цемента, полученная затворением водой с суперпластификатором, также не превышала 29–29,5 °С.

В связи с этим важнейшая задача состояла в замедлении процессов гашения извести и, возможно, 3-кальциевого алюмината. Зола по химическому составу наряду со свободной CaO содержит и Al_2O_3 в количестве 7 %, что благоприятствует образованию $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$.

Цементно-зольное вяжущее состава: зола-унос – 30 %, портландцемент М500 – 70 %, совместно измельченное до удельной поверхности $S_{уд} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$, затворенное водой с суперпластификатором Melflux 5581 F в количестве 0,8 % от массы вяжущего в пересчете на сухое вещество, также быстро схватывалось и сроки схватывания практически не замедлялись несмотря на присутствие цемента. Поэтому замедление

процессов схватывания цементно-золяного вяжущего является актуальной задачей для того, чтобы получить нормированные сроки схватывания. Согласно ГОСТ 31108–2003 «Цементы общестроительные. Технические условия» начало схватывания должно наступать не ранее, чем через 60 минут.



Тепловыделение при гидратации исходной и тонкомолотой золы ТЭЦ-1 и краснойрского цемента

В качестве замедлителей использовали несколько химических добавок: сахарозу и 1-гидроксиэтаниден (1,1-дифосфоновую кислоту). Исследования показали, что ни сахароза, ни дифосфоновая кислота не позволили сколь либо заметно замедлить сроки схватывания. В связи с этим для замедления сроков схватывания был использован гипсовый камень, который, как известно, с одной стороны, регулирует сроки схватывания портландцемента, образуя с 3-кальциевым алюминатом высокосульфатную форму гидросульфалоюмината кальция $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot(31-33)\text{H}_2\text{O}$. С другой стороны, гипсовый камень также замедляет процесс гашения извести в связи с наличием в межчастичном растворе одноименного катиона Ca^{+2} . Исследовали влияние на процесс замедления схватывания дозировки гипса в количестве 3, 5 и 7 % от массы золы. В результате было установлено, что гипс в количестве 7 %, размолотый совместно с золой, позволил отодвинуть начало схватывания до 24 часов, конец схватывания наступил спустя 28 часов. Цементно-золяное вяжущее (в соотношении цемент : зола = 30:70) при добавлении 6 % гипса от массы золы показало нормальные сроки схватывания: начало – через 3 часа, конец – \approx через 5 часов.

Проводилось изучение прочностных показателей чистой золы с гипсовым камнем в количестве 7 % по массе и цементно-золяного вяжущего, состоящего из 30 % портландцемента, 70 % золы и 6 % гипса от массы золы (табл. 1 и 2). Изготавливались образцы-балочки $4\times 4\times 16$ см и испытывались на изгиб и на сжатие.

В табл. 1 приведены прочностные показатели затвердевшего золяного камня на основе золы-уноса ТЭЦ-1. Зола обладает собственной гидравлической активностью, хотя кинетика нарастания прочности очень замедленная, как следует из таблицы. На 1-е сутки прочностные показатели незначительны. Ко 2-м суткам суспензионное вяжущее имело прочность, не превышающую 3 МПа. Через 6–7 суток влажного твердения прочность составляла 8–10 МПа. Процесс наработки коллоидной фазы в золах идет очень медленно из-за того, что стекловидная фаза медленно взаимодействует с известью. Но этот процесс начинает значительно ускоряться к 7–14 суткам и через 28 суток прочностные показатели золяного камня на сжатие достигли 13 МПа.

Состав, реотехнологические свойства суспензии
и прочностные показатели зольного камня

Наименование компонентов	Масса, кг, объем, л, на 1 м ³ ,	Параметры	Прочность на изгиб и прочность при одноосном сжатии, $R_{изг}$, $R_{сж}$, МПа через:			
			2 сут	7 сут	14 сут	28 сут
Зола ТЭЦ-1 + гипс. камень 7 % от золы; $S_{уд}=6760$ см ² /г; $\rho_{ист}=3$ г/см ³	$\frac{1704,3}{549,8}$	$V/B=0,206$	$R_{изг}=0,8$	$R_{изг}=1,1$	$R_{изг}=1,2$	$R_{изг}=1,9$
		$\rho_{вл}=2095$ кг/м ³				
ГП Melflux 5581 F 0,4 % + Хидетал 9γ 1 % от 3	$\frac{38,7}{35,2}$	$\rho_{теор}=2237$ кг/м ³	$R_{сж}=2,8$	$R_{сж}=10$	$R_{сж}=11$	$R_{сж}=13$
$M_{сух}$	1743,0	Распływ конуса Хегерманна 34 см Н.С. 22 часа К.С. 28 часов				
Вода	350,9					
$V_{комп}$	935,9					
$M_{бет.см}$	2093,9					

Т а б л и ц а 2

Состав, реотехнологические свойства суспензии
и прочностные показатели цементно-зольного камня

Наименование компонентов	Масса, кг, объем, л, на 1 м ³ ,	Параметры	Прочность на изгиб и прочность при одноосном сжатии, $R_{изг}$, $R_{сж}$, МПа через:			
			2 сут	7 сут	14 сут	28 сут
ЦЗВ: цемент Красноярский М500 Д0+зола ТЭЦ-1 (30 %:70 %) + гипс. камень 6 % от золы; $S_{уд}=7670$ см ² /г; $\rho_{ист}=3,1$ г/см ³	$\frac{1797,7}{579,7}$	$V/B=0,211$	$R_{изг}=9,3$	$R_{изг}=11,7$	$R_{изг}=12,0$	$R_{изг}=12,5$
		$\rho_{вл}=2205$ кг/м ³				
ГП Melflux 5581 F 0,4 % + Хидетал 9γ 1 % от ЦЗВ	$\frac{30,2}{27,8}$	Распływ конуса Хегерманна 37 см	$R_{сж}=48$	$R_{сж}=76$	$R_{сж}=98$	$R_{сж}=114$
$M_{сух}$	1827,8	Н.С. 3 ч. 10 мин К.С. 4 ч. 50 мин	$\Pi_{R_{сж}}^{уд} = 4,54$ кг/МПа $R_{сжц}^{уд} = 0,22$ МПа/кг $\Pi_{R_{и}}^{уд} = 41,41$ кг/МПа $R_{и}/R_{сж} = 0,11$			
Вода	378,9					
$V_{комп}$	986,4					
$M_{бет.см}$	2206,8					

Для сравнения в табл. 2 представлены свойства цементно-зольного вяжущего при соотношении «цемент : зола» = 30 : 70. Наличие цемента, гидратирующегося в начальный период времени, существенно ускоряет набор прочности цементно-зольного вяжущего и нормированная прочность его достигает 114 МПа. Совершенно очевидно, что эта прочность не соответствует правилу аддитивности. Она обеспечивается не только гидратирующимися зёрнами цемента с образованием «собственных» гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроферритов кальция и других гидратов, но и реакцией взаимодействия продуктов гидратации цемента с золой. То есть зола является реакционно-активной добавкой, не уступающей по своим свойствам микрокремнезему (МК). Стоимость последнего возрастает с транспортировкой от 4 до 5 тыс. руб. за тонну. Количество микрокремнезема, выпускаемого пятью заводами ферросилиция России, составляет всего 150 тыс. т в год. Если его добавлять в количестве 10 % от массы цемента, то весь микрокремнезем можно утилизировать при производстве

4–5 млн м³ бетона в год. Микрокремнезем, являясь высокоэффективной реакционной химической добавкой, при высоком содержании его в бетонах (30–35 % и более от массы цемента) блокирует действие суперпластификаторов в связи с его высокой удельной поверхностью. В отличие от него зола является, с одной стороны, реакционно-химической добавкой, с другой – наиболее эффективной реологически-активной добавкой. Она в чистом виде с СП образует предельно-разжиженные агрегативно устойчивые высокодисперсные и высококонцентрированные суспензии при малом содержании воды, чуть более превышающем содержание воды в суспензии портланд-цемента и составляющем 19–22 %, не ухудшает реологию. Это соответствует нашим основным представлениям о том, что именно реология является главнейшим фактором получения бетонов нового поколения [2]. А превратить бетоны старого и переходного поколения в порошково-активированные бетоны нового поколения можно лишь при значительном добавлении к цементу микрометрических дисперсных добавок [3].

Полученные результаты являются уникальными. Показательно сравнить прочность цементно-зольного вяжущего, имеющего 30 % цемента и 70 % золы, с чистым цементным камнем. Цементный камень, полученный из пластифицированных суспензий с меньшим количеством воды (В/Ц=0,18), имел прочность через 28 суток нормального твердения 130–150 МПа.

Более высокие прочностные показатели получены на цементно-зольном вяжущем, состоящем из равных долей цемента и золы-уноса с добавлением 5 % гипсового камня (табл. 3). Как следует из таблицы, нарастание прочности происходит с высокой интенсивностью: через 2 суток прочность составила 80 МПа, а через 28 суток затвердевшее цементно-зольное вяжущее имело прочность 136 МПа в балочках 4×4×16 см. Тот же самый цемент, залитый из суспензии с содержанием воды 17,6 % с суперпластификатором Melflux 5581 F (0,9 % от массы цемента), через 28 суток показал прочность 140 МПа.

Т а б л и ц а 3

Состав, реотехнологические свойства суспензии и прочностные показатели цементно-зольного камня

Наименование компонентов	Масса, кг объем, л на 1 м ³ ,	Параметры	Прочность на изгиб и прочность при одноосном сжатии, $R_{изг}$, $R_{сж}$, МПа, через:			
			2 сут	7 сут	14 сут	28 сут
ЦЗВ: цемент Красноярский М500 Д0+зола ТЭЦ-1 (50 %:50 %) + гипс. камень 5 % от золы; $S_{уд}=7670 \text{ см}^2/\text{г}$, $\rho_{ист}=3,1 \text{ г}/\text{см}^3$	$\frac{1814,9}{579,7}$	V/B=0,209	$R_{изг}=3,5$	$R_{изг}=13,6$	$R_{изг}=14,5$	$R_{изг}=16,0$
		$\rho_{вл}=2,215 \text{ кг}/\text{м}^3$				
		$\rho_{теор}=2,242 \text{ кг}/\text{м}^3$				
ГП Melflux 5581 F 0,4 % + Хидетал 9у 1 % от В	$\frac{25,4}{27,8}$	Расплав конуса Хегерманна 35 см	$R_{сж}=81$	$R_{сж}=100$	$R_{сж}=118$	$R_{сж}=136$
$M_{сух}$	1840,3	Н.С. 1 ч. 50 мин К.С. 2 ч. 10 мин	$\Pi_{R_{сж}}^{уд}=6,51 \text{ кг}/\text{МПа}$ $R_{сж\text{Ц}}^{уд}=0,15 \text{ МПа}/\text{кг}$ $\Pi_{R_{и}}^{уд}=55,33 \text{ кг}/\text{МПа}$ $R_{и}/R_{сж}=0,12$			
Вода	376,5					
$V_{комп}$	984,0					
$M_{бет.см}$	2216,8					

Важно отметить не только техническую, но и высокую экономическую эффективность по обобщающему критерию – удельному расходу цемента на единицу прочности при сжатии $\Pi_{R_{сж}}^{уд}$. Удельный расход клинкерного цемента в цементно-зольном вяжущем при соотношении «цемент : зола» = 50 : 50 на единицу прочности при

сжатию, как показали результаты исследования, составил 6,51 кг/МПа при прочности 136 МПа.

Таким образом, наиболее высокая эффективность золы для малоцементных бетонов будет обеспечиваться при соотношении «цемент : зола» = 30 : 70. Полагаем, что с учетом создания в последние годы высокоэффективных планетарных мельниц с невысокими расходами электроэнергии на тонну измельчаемого материала помол до удельной поверхности 5000–6500 см²/г не является проблемой. Использование зол с их большой долей в составе цементно-зольного вяжущего будет способствовать быстрому процессу утилизации зол при получении более прочных, более экономичных порошково-активированных бетонов нового поколения.

Таким образом, высокая прочность цементно-зольного камня, конкурирующая с прочностью цементного, является гарантией получения как сверхвысокопрочного бетона на цементно-зольных вяжущих с прочностью более 100 МПа, так и бетонов общестроительных марок от М200 до М1000.

Список литературы

1. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2011. – №3. – С. 103–106.
2. Калашников, В.И. Через рациональную реологию — в будущее бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. Технологии бетонов. – 2007. – № 5. – С. 8–10; 2007. – №6. – С. 8–11; 2008. – №1. – С. 22–26.
3. Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Бетон и железобетон. Оборудование, материалы, технологии. – 2012. – №1. – С. 54–61.

References

1. Kalashnikov, V.I. The terminology of science of concrete of new generation / V.I. Kalashnikov // Building Materials. – 2011. – № 3. – P. 103–106.
2. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology – the future of concrete / V.I. Kalashnikov // Building materials, equipment, technologies of XXI century. Concrete technology. – 2007. – № 5. – P. 8–10; 2007. – № 6. – P. 8–11; 2008. – № 1. – P. 22–26.
3. Kalashnikov, V.I. How to turn the concrete of the old generation in a new generation high-performance concretes / V.I. Kalashnikov // Concrete and reinforced concrete. Equipment, materials and technology. – 2012. – № 1. – P. 54–61.

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел.: (8342) 48-25-64

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

Юркин Юрий Викторович,
кандидат технических наук, доцент
кафедрой «Прикладная механика»
E-mail: yurkinuv@gmail.com

Авдонин Валерий Викторович,
аспирант кафедры «Прикладная механика»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 48-25-64

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

Yurkin Yuriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Applied mechanics»
E-mail: yurkinuv@gmail.com

Avdonin Valeriy Viktorovich,
Postgraduate of the department «Applied
mechanics»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА ВИБРОПОГЛОЩАЮЩЕГО КОМПОЗИТА*

В.Д. Черкасов, Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин

Предложена методика подбора состава вибропоглощающего материала, основанная на модели трехкомпонентного композита. Алгоритм позволяет проектировать композит с заданными модулем упругости и коэффициентом потерь.

Ключевые слова: проектирование состава, вибропоглощающий материал, модуль упругости, коэффициент потерь.

DAMPING COMPOSITE MATERIAL: DESIGN OF STRUCTURE

V.D. Cherkasov, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin

Technique of damping composite material selection, based on a three-component composite model is offered. This algorithm allows to design a composite with a set of data on elasticity and coefficient of losses.

Keywords: structure design, damping composite material, young's modulus, loss factor.

Наиболее просто и эффективно повысить вибропоглощающие свойства зернистого композита можно путем введения на границу раздела матрицы и наполнителя разделительного (межфазного) слоя, в качестве которого, как правило, применяют неотвержденный полимер, несовместимый с полимером матрицы. Схематично структура такого композита показана на рис. 1.

Здесь идет речь о наглядном способе проектирования состава композита указанной структуры с заданными модулем упругости E и коэффициентом потерь η .

Одним из способов проектирования состава является математическое моделирование композита с выводом аналитических зависимостей эффективных свойств композита от количества и свойств его компонент. Существует большое число моделей композита, однако описываемый способ можно применить к любой из них, в которой получены аналитические зависимости модуля упругости и коэффициента потерь для трехкомпонентного композита [1-3]. Входными данными для этой модели являются

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.527.12.0007 от 11.10.2011 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

физико-механические характеристики компонент (такие, как модуль упругости, коэффициент потерь и коэффициент Пуассона) для матрицы, межфазного слоя и наполнителя, а также их количественное содержание. Обозначим $v = 1$ – объем всего композита; v_m , v_f и v_n – объем соответственно матрицы, межфазного слоя (МФС) и наполнителя так, что $v_m + v_n + v_f = 1$.

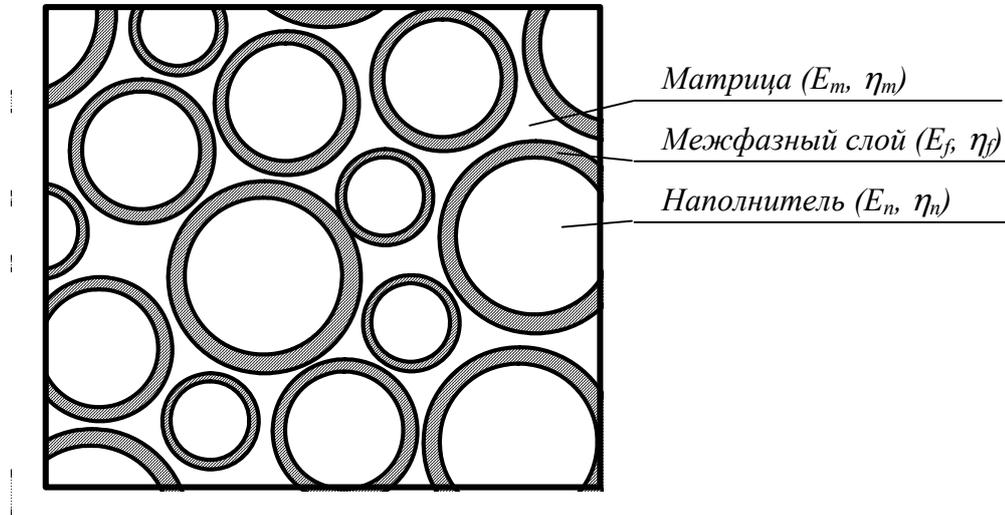


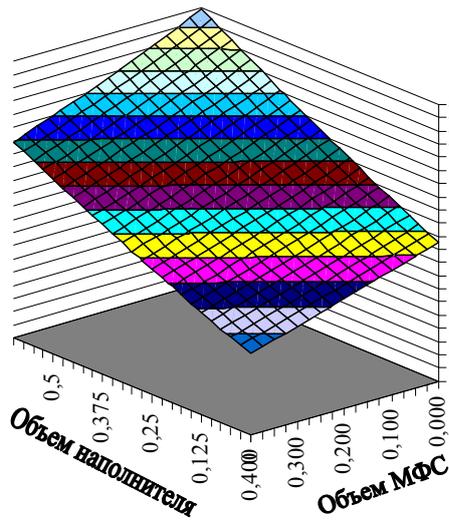
Рис. 1. Схема трехслойного композита

Предположим, что нам требуется спроектировать композит из некоторых материалов матрицы, МФС и наполнителя и что свойства их известны. Тогда решением задачи проектирования станет определение объемов v_f и v_n , при которых композит имеет требуемые модуль упругости и коэффициент потерь. Для этого построим, например, в программе Microsoft Excel поверхность зависимости модуля упругости от объемов наполнителя и межфазного слоя (рис. 2, а), а также поверхность зависимости коэффициента потерь от тех же факторов (рис. 2, б) по формулам модели. Горизонтальные проекции этих поверхностей представлены соответственно на рис. 2, в, г. Совместим горизонтальные проекции поверхностей E и η (см. рис. 2, в, г) на одном рисунке. В результате получим номограмму, показанную на рис. 3. Наклонные сплошные и пунктирные линии на номограмме – уровни соответственно модуля E и коэффициента η . Подобная номограмма строится для каждой комбинации компонентов материала.

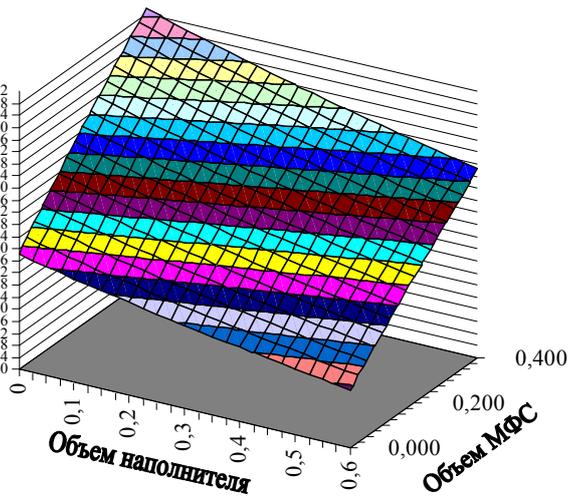
Порядок определения состава композита с заданными свойствами по номограмме заключается в следующем. Задаются требуемый модуль упругости и коэффициент потерь композита. На номограмме находятся соответствующие им линии, а также точка их пересечения. Координата этой точки на горизонтальной оси соответствует относительному объемному количеству наполнителя (v_n), а на вертикальной оси – относительному объемному количеству межфазного слоя (v_f) в единице объема композита. Относительный объем матрицы рассчитывается по формуле: $v_m = 1 - v_n - v_f$.

Действительная область возможного состава композита ограничена двумя наклонными линиями: линией предельного объемного наполнения (на рис. 2 принято $\mu_{fn}^{\max} = 0,6$) и линией предельной толщины межфазного слоя (на рис. 2 принято $\mu_f^{\max} = 0,5$); поэтому точка пересечения прямых должна обязательно находиться внутри треугольника. В противном случае создание композита с заданными модулем упругости и коэффициентом потерь из данной комбинации материалов невозможно.

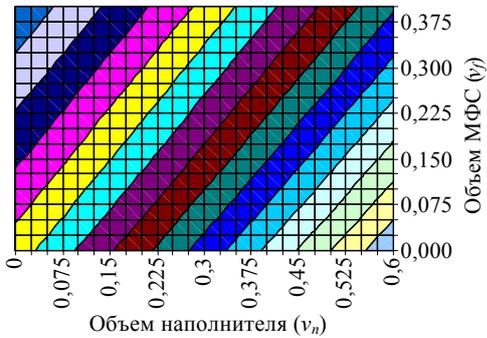
а. Значения модуля упругости E



б. Значения коэффициента потерь η



в. Зависимость модуля E



г. Зависимость коэффициента η

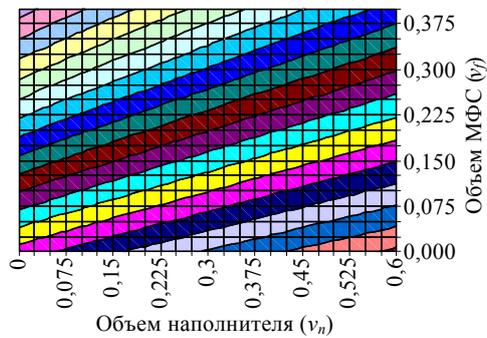


Рис. 2. Эффективные характеристики E и η трехслойного композита в зависимости от объемного содержания наполнителя и межфазного слоя

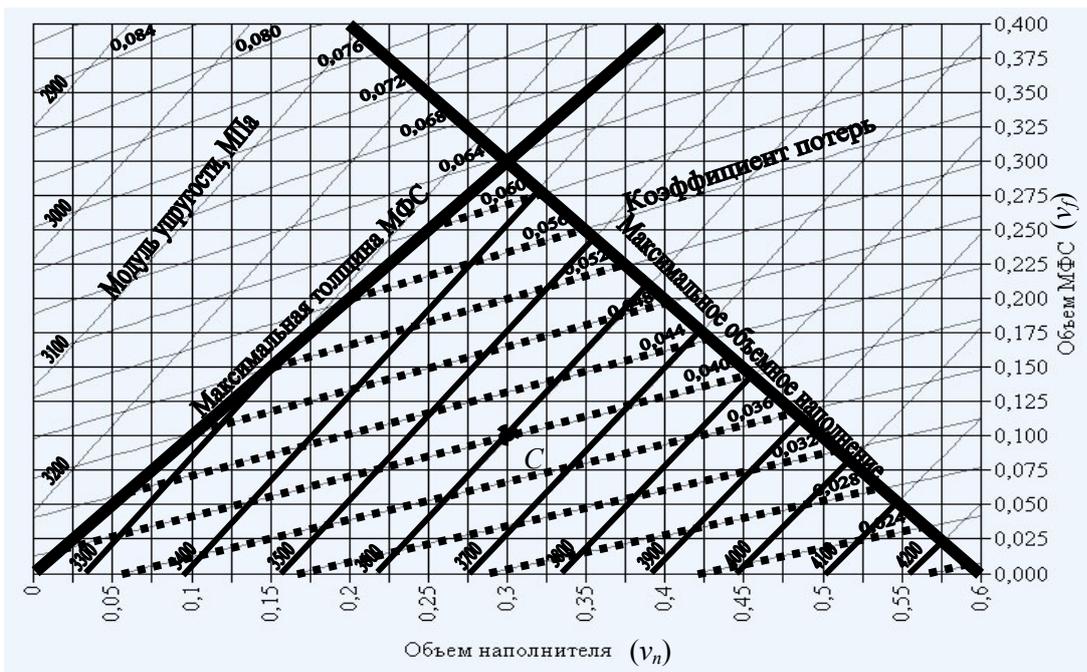


Рис. 3. Номограмма свойств композита в зависимости от различного объемного содержания компонент

П р и м е р . Необходимо запроектировать композит с требуемыми модулем упругости 3600 МПа и коэффициентом потерь 0,04 из материалов, для которых построена номограмма (см. рис. 3). На номограмме находим наклонную сплошную линию со значением 3600 и наклонную пунктирную линию со значением 0,04, а также точку их пересечения (точка *C* на рис. 3). Координата этой точки по оси $v_n - 0,3$, по оси $v_f - 0,1$. Следовательно, для получения композита с требуемыми свойствами необходимо: наполнителя – 30 % от объема композита, МФС – 10 % и матрицы – 60 %.

Выводы

Предложенная методика подбора состава вибропоглощающего композита позволяет получать материал с заданными модулем упругости и коэффициентом потерь. Применение данного алгоритма значительно экономит время технологов и инженеров, занимающихся разработкой новых и специальных вибропоглощающих материалов.

Список литературы

1. Бартнев, Г.М. Структура и релаксационные свойства эластомеров / Г.М. Бартнев. – М.: Химия, 1979. – 387 с.
2. Соломатов, В.И. Вибропоглощающие композиционные материалы / В.И. Соломатов, В.Д. Черкасов, Н.Е. Фомин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 96 с.
3. Козлов, П.В. Физико-химические основы пластификации полимеров / П.В. Козлов, С.П. Попков. – М.: Химия, 1982. – 224 с.

References

1. Bartenev, G.M. Structure and relaxation properties of elastomers / G.M. Bartenev. – M.: Chemistry, 1979. – 387 p.
2. Solomatov, V.I. Damping composite materials of / V.I. Solomatov, V.D. Cherkasov, N.E. Fomin. – Saransk: Publishing house of the Mordovian university, 2001. – 96 p.
3. Kozlov, P.V. Physical and chemical bases of plasticization of polymers / P.V. Kozlov, S.P. Popkov. – M: Chemistry, 1982. – 224 p.

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел.: (8342) 48-25-64

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Строительные материалы
и технологии»
E-mail: yarofeevvt@mail.ru

Родин Александр Иванович,
аспирант кафедры «Строительные
материалы и технологии»
E-mail: al_rodin@mail.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 48-25-64

Yerofeev Vladimir Trofymovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head
of the department «Building materials
and technologies»
E-mail: yarofeevvt@mail.ru

Rodin Alexander Ivanovich,
Postgraduate of the department «Building
materials and technologies»
E-mail: al_rodin@mail.ru

БИОСТОЙКОСТЬ ДЕКОРАТИВНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.Т. Ерофеев, А.И. Родин

Приведены результаты исследования биостойкости декоративных цементных композитов. Рассмотрен видовой состав доминирующих микромицетов на поверхности материалов. Определены показатели обрастаемости композитов на декоративных портландцементах разных производителей. Представлены результаты исследования влияния микроорганизмов на изменение прочностных характеристик и цвета декоративных цементных композитов.

Ключевые слова: биостойкость, декоративные цементы, композиты, код RGB, физико-механические свойства.

BIOLOGICAL STABILITY OF DECORATIVE CEMENT COMPOSITES

V.T. Yerofeev, A.I. Rodin

The results of the study of biological stability of decorative cement composites is presented. Micromycetes dominant species composition on the surface of materials is given. Indicators of composite growing on decorative Portland cements of different manufacturers is presented. Results of impact of micro-organisms on changing of strength characteristics and color of decorative cement composites are shown.

Keywords: biological stability, decorative cements, composites, code RGB, physical and mechanical properties.

Введение

В последнее время в строительстве широко применяются декоративные бетоны и растворы на основе белых и цветных цементов. Контактное взаимодействие композиционных материалов с биологическими средами природного и техногенного происхождения сопровождается различными физико-химическими процессами, снижающими эксплуатационную надежность изделий и конструкций. Негативное действие биологически агрессивных сред на строительные изделия и конструкции, экологическую ситуацию в зданиях и сооружениях не раз отмечалось исследователями. Разрушение Шоллар-Бакинского бетонного водопровода, наружных бетонных стен силовой и шлюзовой станций Свирь-ГЭС, железобетонных конструкций на Кировоградском, Каменец-Подольском, Киевском и других мясокомбинатах, козырька станции метро «Сенная площадь» в г. Санкт-Петербурге и других строительных конструкций непосредственно связано с деятельностью микроорганизмов. Из-за ухудшения экологической ситуации в зданиях и сооружениях от действия бактерий и плесневых

грибов расширяется перечень заболеваний людей. Тратятся огромные денежные средства на ремонт поврежденных конструкций, лечение больных, профилактику заболеваний. В этом случае к декоративным бетонам, эксплуатирующимся в условиях воздействия подобных агрессивных сред, предъявляются повышенные требования по сохранению их не только первоначальных упругопрочностных показателей, но и декоративных свойств [1, 2, 3].

Цель исследований состояла в определении биостойкости композитов на основе белых цементов, выявлении доминирующих видов плесневых грибов на их поверхности, изучении влияния плесневых грибов на изменение цвета композита.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились на образцах цементного камня, полученного из раствора нормальной густоты. В качестве вяжущих при изготовлении композитов использовались: портландцемент белый 1–500–Д0–ГОСТ 965–89 (ОАО «Щуровский цемент», Россия, г. Коломна) и портландцементы белые 1–600–Д0–ГОСТ 965–89 (Египет, Дания, Италия). Образцы изготавливались в виде балочек с размерами 1×1×3 см, которые перед испытаниями твердели в течение 28 суток во влажных условиях.

Образцы испытывались по ГОСТ 9.049–91 в среде, состоящей из следующих видов мицелиальных грибов: *Aspergillus oryzae* (Ahiburg) Cohn, *Aspergillus niger* vgn Tieghem, *Aspergillus terreus* Thom, *Chaetomium globosum* Kunze, *Paecilomyces varioti* Bainier, *Penicillium funiculosum* Thom, *Penicillium chrysogenum* Thom, *Penicillium cyclopium* Westling, *Trichoderma viride* Peis, ex Fr.

Обрастаемость декоративных цементных композитов плесневыми грибами определялась методами 1 (без дополнительных источников углеродного и минерального питания) и 3 (на твердой питательной среде Чапека–Докса) с установлением грибоустойчивости и фунгицидности, соответственно. Коэффициент биологической стойкости определялся путем испытания композитов, выдержанных в течение 6 месяцев по методу 3. Для определения изменения массосодержания образцы, изъятые из среды, протирали ватным тампоном, смоченным в спирте. Затем контрольные образцы и образцы, выдержанные в среде, высушивались в течение 5 ч в сушильном шкафу при температуре 50 °С, после чего взвешивались. Количество испытанных образцов обеспечивало точность эксперимента не менее 95 %.

Идентификацию микромицетов проводили на основании их морфолого-культуральных особенностей, используя различные определители [4].

Исследование изменения цвета поверхности декоративных цементных композитов – кода RGB – в зависимости от длительности выдерживания в среде мицелиальных грибов выполнялось с помощью разработанного приложения к программе MATLAB. Композиты, испытанные по методу 3 (ГОСТ 9.049–91), сканировались с разрешением вывода 1 200 ppi, затем результаты сканирования обрабатывались программой.

Результаты и их обсуждения

В результате проведенного исследования обрастаемости декоративного цементного камня (табл. 1) было установлено, что независимо от производителя цемента и, как следствие, сырья для изготовления декоративного вяжущего все композиты имеют оценку роста грибов: 0–1 балл – по методу 1 и 4 балла – по методу 3. Это говорит об отсутствии микромицетов на поверхности композитов без питательной среды и почти оптимальных условиях для жизнедеятельности микроорганизмов при её наличии.

Идентификация доминирующих микромицетов на поверхности цементного камня после 1 месяца испытаний по методу 3 (см. табл. 1) установила доминирование *Aspergillus niger*, *Penicillium cyclopium* и *Penicillium chrysogenum* практически на всех декоративных цементных композитах. Именно эти грибы относятся к числу наиболее агрессивных по отношению к железобетонным строительным конструкциям и к числу наиболее распространенных на предприятиях перерабатывающей промышленности видов микроорганизмов. Кроме того, *Aspergillus niger*, или «черная аспергилла», вызывает инвазивный легочный аспергиллез, бронхолегочный ас-

пергиллез (АВРА), хронический некротизирующий легочный аспергиллез, аллергический грибковый гайморит и отит, а также повреждает ген р53 в 234-м кодоне 8-го экзона, т.е. потенциально онкоген. Не менее вредны и другие микромицеты, идентифицированные на поверхности декоративных композитов.

Разрушающее действие микромицетов на цементные композиты обусловлено, по мнению целого ряда авторов, агрессивным воздействием метаболитов грибов – органических кислот, окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов – на отдельные компоненты материалов [5].

Т а б л и ц а 1

Обрастаемость декоративного цементного камня и видовой состав микроорганизмов на его поверхности

№ состава	Наименование цемента по ГОСТ 10178–85. Предприятие (страна)-изготовитель	Оценка роста грибов в баллах		Характеристика по ГОСТ 9.049–91	Видовой состав доминирующих микроорганизмов около и на образце цементного камня после месяца выдерживания в чашке Петри (ГОСТ 9.049–91 – метод 3)
		Метод 1	Метод 3		
1	2	3	4	5	6
1	Портландцемент белый 1–500–Д0–ГОСТ 965–89 ОАО «Щуровский цемент» (России, г. Коломна)	0	4	Грибостоек	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>
2	Портландцемент белый 1–600–Д0–ГОСТ 965–89 (Египет)	0	4	Грибостоек	<i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i>
3	Портландцемент белый 1–600–Д0–ГОСТ 965–89 (Дания)	1	4	Грибостоек	<i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Trichoderma viride</i>
4	Портландцемент белый 1–600–Д0–ГОСТ 965–89 (Италия)	1	4	Грибостоек	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Paecilomyces variotii</i>

Изменение состава химических соединений цементного камня при воздействии продуктов метаболизма плесневых грибов исследовалось учеными Мордовского государственного университета. В результате проведенного химического анализа поврежденного цементного камня было установлено наличие таких новообразований, как цитраты, оксалаты, остатки разложившихся минералов цементного камня (одноосновные силикаты и гидросиликаты, алюминаты и ферриты кальция) [5]. Все описанные изменения в составе цементного камня отрицательно сказываются на его эксплуатационных характеристиках.

Данные изменения массосодержания декоративных цементных композитов, представленные на рис. 1а, показывают значительное увеличение массы образцов в первые месяцы экспозиции в среде мицелиальных грибов по методу 3. Это говорит о продолжении процесса гидратации композитов, т.к. метод 3 характеризуется благоприятной для твердения цемента средой (температура (29 ± 2) °С и влажность свыше 90 %), а также об увеличении количества новообразований в результате взаимодействия клинкерных минералов и продуктов их гидратации с биологическими средами. Процессы замедления роста массы к 3 месяцам экспозиции и последующего её уменьшения характеризуются развитием деструктивных процессов в материале.

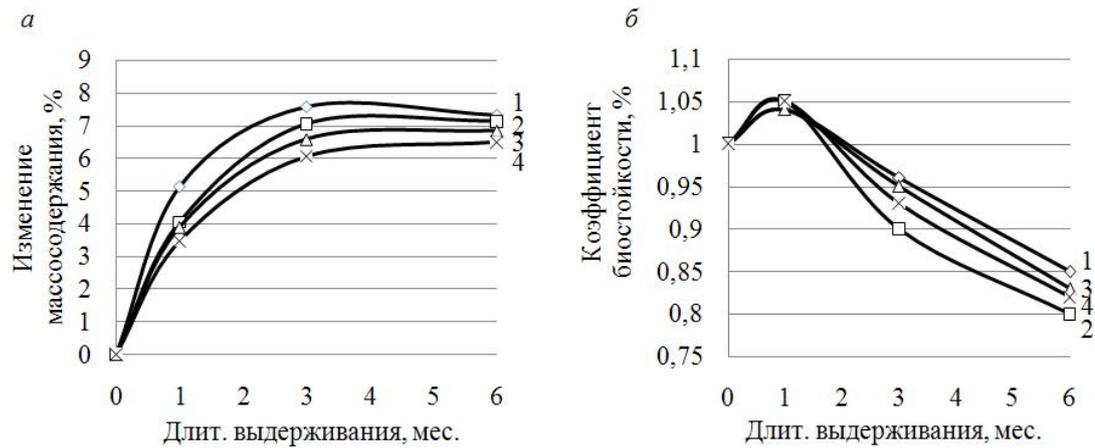


Рис. 1. Зависимости массосодержания (а) и коэффициента биостойкости (б) декоративных цементных композитов от длительности выдерживания в среде мицелиальных грибов:
 1 – композит на основе белого портландцемента, страна-производитель Россия;
 2 – то же, Египет, 3 – то же, Дания; 4 – то же, Италия

Данные изменения коэффициента биостойкости декоративных цементных композитов, представленные на рис. 1б, показывают незначительное повышение прочности образцов в первый месяц экспозиции в среде мицелиальных грибов. Это объясняется возрастанием плотности композита от суммарного действия процессов гидратации и, в отличие от контрольных образцов, увеличением количества новообразований, действующих конструктивно. Падение коэффициента биостойкости до 0,9–0,95 к 3 месяцам экспозиции и дальнейшее падение до 0,8–0,85 к 6 месяцам объясняется развитием деструктивных процессов в материале.

Можно выделить два типа изменения цвета поверхности строительных изделий и конструкций, изготовленных с применением декоративных цементов: из-за загрязнения и вследствие химических превращений, протекающих на поверхности материалов от контактирования с различными средами. Влияние биологически агрессивных сред на изменение цвета характеризуется наличием обоих типов (1 – грибы, заселившиеся на изделия, 2 – клинкерные минералы и продукты их гидратации образуют с элементами их жизнедеятельности новые соединения, имеющие разные цвета).

Анализируя рис. 2, можно утверждать, что изменение цвета поверхности декоративных цементных композитов по всей длине образца практически одинаково. Это говорит о негативном действии микромицетов и продуктов их жизнедеятельности на изменение цвета поверхности всего образца, а не отдельных его участков. В табл. 2 приведено изменение цвета композитов в зависимости от длительности выдерживания в среде.

Данные изменения кода RGB поверхности декоративных композитов, представленные на рис. 2 и в табл. 2, показывают незначительное изменение цвета поверхности материала после 1 месяца экспозиции в среде мицелиальных грибов, что объясняется инкубационным периодом микроорганизмов на поверхности и, как следствие, незначительным выделением агрессивных соединений, вступивших в реакцию и изменивших её цвет. Дальнейшая экспозиция декоративных композитов меняет цвет их поверхности с белого на бежевый уже после 3 месяцев испытаний для всех композитов, изготовленных на импортных цементах, и почти сливочный после 6 месяцев. Композиты на основе отечественного вяжущего первоначально имели цвет морской пены, что говорит о невысоком качестве вяжущего, и уже после первого месяца экспозиции поверхность стала льняного цвета. Дальнейшая экспозиция данных композитов меняет цвет их поверхности, как и в случае с композитами на импортных вяжущих, что объясняется практически полным изменением состава химических соединений в поверхностном слое в более поздние периоды воздействия биологической среды.

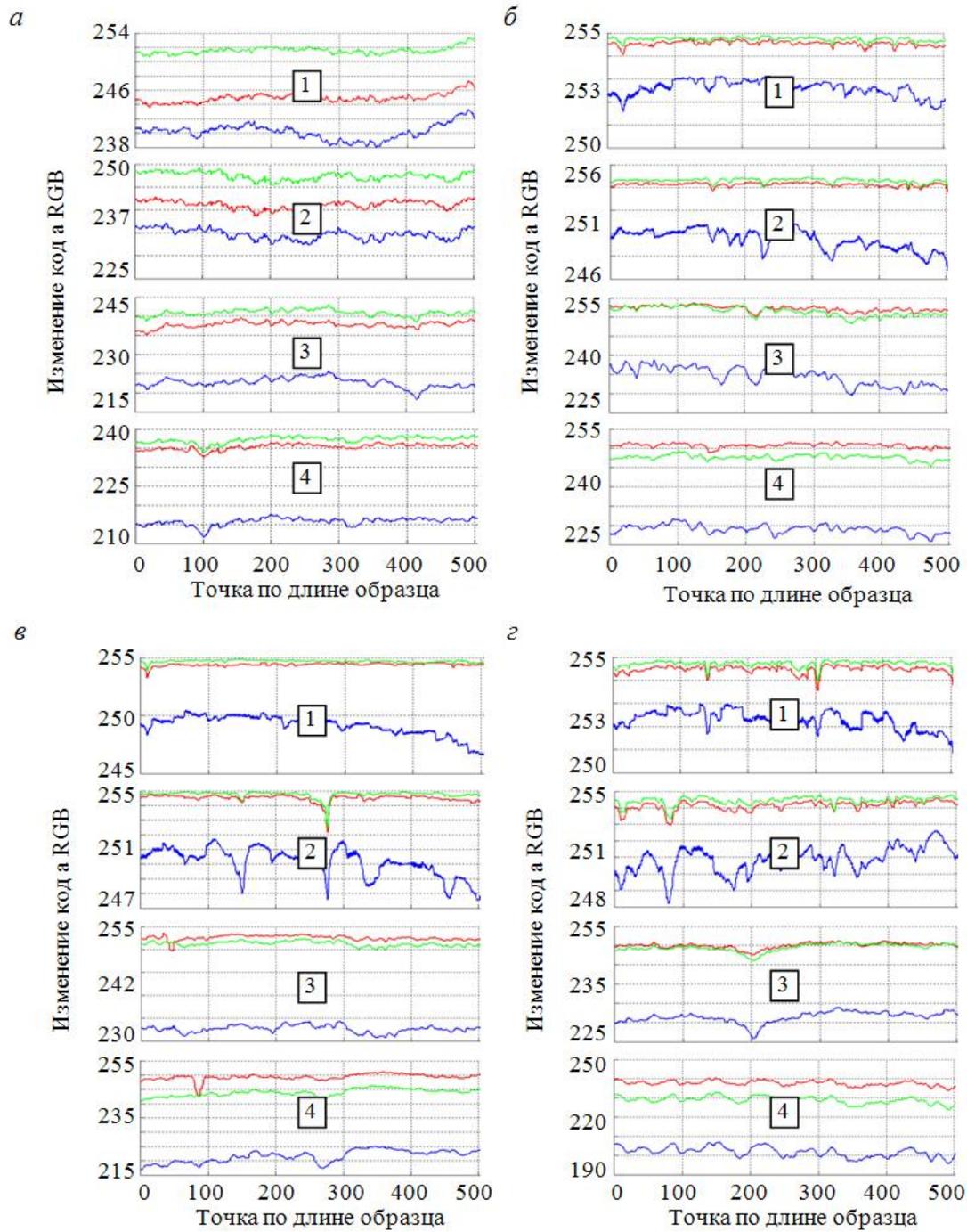


Рис. 2. Зависимость кода RGB поверхности декоративных цементных композитов на основе белых портландцементов производства России (*a*), Египта (*б*), Дании (*в*) и Италии (*г*) от длительности выдерживания в среде мицелиальных грибов:
 1 – до экспозиции, 2 – через 1 месяц экспозиции, 3 – через 3 месяца экспозиции, 4 – через 6 месяцев экспозиции

Изменение цвета поверхности декоративных цементных композитов
в зависимости от длительности выдерживания в среде мицелиальных грибов

Цемент, из которого изготовлен композит	Длительность выдерживания в среде мицелиальных грибов, мес.	Среднее значение кода RGB поверхности композита			Характеристика цвета по коду
		R	G	B	
Портландцемент белый 1–500–Д0–ГОСТ 965–89 ОАО «Щуровский цемент» (России, г. Коломна)	0	245	251	240	Морской пены
	1	242	247	235	Льняной
	3	237	240	222	Бежевый
	6	235	237	215	Бежевый
Портландцемент белый 1–600–Д0–ГОСТ 965–89 (Египет)	0	254	255	252	Белый
	1	254	254	250	Белый
	3	252	252	233	Бежевый
	6	251	248	229	Бежевый
Портландцемент белый 1–600–Д0–ГОСТ 965–89 (Дания)	0	254	255	250	Белый
	1	254	254	250	Белый
	3	253	251	233	Бежевый
	6	250	243	220	Бежевый
Портландцемент белый 1–600–Д0–ГОСТ 965–89 (Италия)	0	254	255	252	Белый
	1	254	254	250	Белый
	3	250	250	231	Бежевый
	6	238	230	203	Сливочный

Выводы

1. Установлено негативное действие микромицетов и продуктов их жизнедеятельности на прочность декоративных цементных композитов (через 6 месяцев экспозиции падение прочности составило 15–20 %).

2. Доказано влияние микромицетов и продуктов их жизнедеятельности на изменение цвета поверхности материала (после 3 месяцев экспозиции поверхность декоративных композитов стала бежевой, а после 6 – почти сливочной).

3. Идентифицированы доминирующие виды микромицетов на поверхности декоративных материалов (уже после месяца испытаний установлено доминирование *Aspergillus niger*, *Penicillium cyclospium* и *Penicillium chrysogenum*, которые являются одними из самых опасных микромицетов для здоровья человека).

4. Установлено, что не может быть рекомендовано применение декоративных цементных композитов в биологически активных средах без специальных методов защиты. Наиболее эффективным способом защиты бетонов является введение биоцидных препаратов при изготовлении композитов или использование биоцидных цементов.

Список литературы

1. Биоцидные цементные композиты с добавками, содержащими гуанидин / В.Т. Ерофеев [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2010. – № 4 (16). – С. 87–94.

2. Влияние модифицирующих добавок на стойкость цементных композитов в условиях воздействия модельной бактериальной среды / В.Т. Ерофеев [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 121–126.

3. Проблемы биоповреждений и биозащиты строительных материалов, изделий и конструкций / Н. И. Карпенко [и др.] // Биоповреждения и биокоррозия в строительстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск, 2004. – С. 6–11.

4. Бицидный портландцемент с улучшенными физико-механическими свойствами / В.Т. Ерофеев [и др.] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 8, Issue 3. – М.: АСВ; Нью-Йорк: Begell House Inc., 2012. – С. 81–92.
5. Биологическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов [и др.] – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 196 с.

References

1. Biocidal cement composites with additives containing guanidine / V.T. Erofeev [etc.] // The list of scientific journal. – 2010. – № 4 (16). – P. 87–94.
2. Influence of modifying additives on the durability of cement composites under conditions of a model bacterial protection / V.T. Erofeev [etc.] // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences. – 2011. – № 4. – P. 121–126.
3. Problems of biological damage and biosecurity building materials, products and structures / N.I. Karpenko [etc.] // Biodeteriorations and biocorrosion in Construction: Materials Int. Scientific. tehn. Conf. – Saransk, 2004. – P. 6–11.
4. Biocidal Portland cement with improved physical and mechanical properties / V.T. Erofeev [etc.] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 8, Issue 3. – М.: Publishing House of the DIA; New York: Acad Begell House Inc., 2012. – P. 81–92.
5. Biological resistance of materials / V.I. Solomatov [etc.] – Saransk: Publishing House of the muzzle. Unt., 2001. – 196 p.

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел.: (8342) 48-25-64

Федорцов Анатолий Петрович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные материалы
и технологии»

Федорцов Владислав Анатольевич,
соискатель кафедры «Строительные
материалы и технологии»

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 48-25-64

Fedortsov Anatoliy Petrovich,
Candidate of Sciences, Professor of the
department «Building materials and
technology»

Fedortsov Vladislav Anatol'evich,
Applicant of the department «Building
materials and technology»

О ПОТЕНЦИАЛЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА И ЕГО ИЗМЕНЕНИИ

А.П. Федорцов, В.А. Федорцов

Приводятся определение потенциала свойства материала и возможность его выражения посредством количественных характеристик этого свойства. Показывается, что воздействие на материал в любой момент времени будет оказывать тем большее влияние на потенциал свойства, чем больше возможность изменения потенциала и меньше сопротивляемость ему (изменению) в это время.

Ключевые слова: потенциал, материал, свойство, сопротивление, прочность.

ON POTENTIAL PROPERTIES OF A MATERIAL AND ITS CHANGES

A. P. Fedortsov, V. A. Fedortsov

A definition of material properties potential and the opportunity of its expression through the quantitative characteristics of this property are given. It is shown that the influence on a material, at any period of time will provide the greater impact on potential properties the more the possibility of changes in capacity and less resistance to its change at this time.

Keywords: potential, material, property, resistance, toughness.

Потенциалом, в математическом понимании, называется скалярное поле $U(x, y, z)$, градиент которого ($\text{grad } U$) порождает потенциальное поле $\vec{p}(x, y, z)$. Согласно [1], потенциальное поле характеризуется выражением:

$$\vec{p}(x, y, z) = \text{grad } U, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{k},$$

где x, y, z – координаты поля в декартовой системе координат; \vec{k} – единичные векторы.

Направление вектора \vec{p} в любой точке совпадает с направлением, в котором скорость изменения потенциала U на отрезке ΔL , т.е. градиент потенциала ($\Delta U/\Delta L$), достигает наибольшего значения, а модуль вектора равен этому наибольшему значению скорости. Таким образом, градиент скалярной функции есть вектор, направленный в сторону максимально быстрого возрастания этой функции, и численно равен скорости ее увеличения в указанном направлении.

Понятие потенциала широко применяется при характеристике электрических, тепловых, массовых полей. Численно потенциал равен потенциальной энергии, кото-

рая при образовании разности потенциалов может перераспределяться или превращаться в другой ее вид. Любой строительный материал также обладает потенциальной энергией. Для конструкционных материалов она характеризуется энергией притяжения между частицами и зависит от количества и прочности образованных в материале связей. При воздействиях потенциальная энергия расходуется на ослабление их причин. При этом расход потенциальной энергии может привести к потере эксплуатационных свойств: прочности, упругости и т. д.

Согласно [2], потенциал (от лат. *Potentia* – сила) характеризует скрытые возможность, способность, силу, которые могут проявиться при наличии определенных условий. Очевидно, что для материала эти скрытые возможность, способность и сила определяются вполне конкретными средствами. Средства, источники, которые обеспечивают сохранение свойства до допустимого предела при воздействии факторов внутренней и внешней среды, будем называть потенциалом свойства материала. Поскольку содержание средств, обеспечивающих свойство материала, со временем меняется, т.е. меняется его потенциал, то представляют интерес особенности изменения этого фактора при воздействиях.

При выборе материала обычно принимаются во внимание значения его основных технических характеристик и их сохранение во время эксплуатации. Очевидно, что потенциал свойства количественно определяет соответствующую характеристику свойства материала и косвенно может выражаться через ее значение.

Воздействие на систему, в частности цементную, может быть внутренним и внешним. Внутреннее воздействие может осуществляться, например, путем введения добавок, которое направлено на изменение свойства, а следовательно, и его потенциала. Внешнее воздействие на материал осуществляется под влиянием факторов окружающей среды во время как его получения, так и эксплуатации.

Согласно (1), чем больше скорость изменения потенциала U , т.е. больше $\text{grad } U = \Delta U / \Delta L$ за любой малый промежуток времени, тем быстрее, в отсутствие пополнения, расходуется потенциал при воздействиях и противодействиях. Обозначим изменение характеристики свойства материала за любой малый промежуток времени воздействия агрессивной среды Δt через ΔB . Тогда для его определения, применительно к одномерной задаче, будем иметь выражение

$$\Delta B = \alpha \text{ grad } U = \alpha \frac{\Delta U}{\Delta L}, \quad (2)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Очевидно, при прогнозируемом конечном (после воздействия) значении потенциала чем больше его начальное значение, тем больше при воздействии возможное изменение потенциала, т.е. ΔU . Таким образом, величина начального потенциала (начальное значение характеристики свойства) оказывает влияние на его изменение при воздействиях. При прочих равных условиях чем больше потенциал и возможное его уменьшение, тем больше снижение потенциала, а соответственно уменьшение характеристики свойства при воздействии.

В научной литературе имеются многочисленные результаты исследований, когда у бетонов с более высоким первоначальным пределом прочности при равном, а иногда и большем физико-химическом сопротивлении под воздействием агрессивных сред наблюдаются и более значимые его потери в начальное время. По нашим данным (табл. 1), кислотостойкость цементного камня из смеси с В/Ц = 0,35 во многом определяется условиями его отвердевания. Об этом свидетельствуют значения предела прочности и коэффициента стойкости материала по истечении 90 суток выдержки в агрессивной среде; какая-либо связь этих характеристик с его первоначальной прочностью не наблюдается. Однако через 7 суток действия среды имеет место снижение прочности, которое тем больше, чем выше первоначальная прочность цементного камня. В дальнейшем, как видно из табл. 1, происходят изменения в степени потери первоначальной прочности. При этом становится очевидным, что цементный камень с более высокой первоначальной потерей прочности может иметь не самые низкие

конечные характеристики свойства. Отсюда следует, что на изменение прочности материала в агрессивной среде, кроме начального потенциала (прочности), большое влияние оказывает способность материала сопротивляться изменению, т. е. его физико-химическое сопротивление.

При действии агрессивных сред на строительные композиты наряду с процессами их деструкции протекают и процессы структурообразования [3]. При этом если в какой-то период времени процессы структурообразования преобладают над процессами деструкции и материал упрочняется, то чем больше потенциал последующего упрочнения (ниже начальная прочность и выше химическая стойкость образованных связей, наличие необходимых веществ) и меньше сопротивление ему, то тем более выражены эффекты упрочнения и повышения физико-химического сопротивления. Так, согласно нашим исследованиям (см. табл.1), у цементного камня, отвердевшего в воздушных условиях и имеющего из-за низкой начальной прочности большую возможность упрочняться в 2 % растворе серной кислоты, наблюдается не только упрочнение в начальное время выдержки в среде, но и более высокое физико-химическое сопротивление.

Т а б л и ц а 1

Влияние условий отвердевания на первоначальный предел прочности при сжатии цементного камня и его изменение при действии 2 % H_2SO_4 (по данным [4])

№ п/п	Условия твердения	$\sigma_{пч}$ (0 сут), МПа	$\sigma_{пч}$ (7 сут), МПа	% потери $\sigma_{пч}$	$\sigma_{пч}$ (90 сут), МПа	$K_{ст}$, 90 сут
1	0,25 % H_2SO_4 и вода	82	34	58,5	34	0,4
2	Вода	78	51	34,6	25	0,35
3	Нормальные условия	63	48	23,8	26	0,42
4	0,5 % H_2SO_4 и вода	62	48	22,6	30	0,5
5	2 % $MgSO_4$	60	47	21,7	35	0,57
6	2 % $(NH_4)_2SO_4$	60	51	15	30	0,5
7	Пропарка	50	46	8	44	0,87
8	Воздушные усл. ($t = (20 \pm 2) ^\circ C$, $W = 65 \div 70 \%$)	43	49	–	39	0,9

По истечении 90 суток воздействия агрессивной среды предел прочности цементного камня, отвержденного в воздушных условиях, на 56 % превышает подобный показатель материала водного отвердевания. Очевидно, что на конечный результат прочности при выдержке материала в агрессивной среде оказывает влияние как недоотверждение цементного камня (величина возможного изменения потенциала), так и его способность в таком состоянии сопротивляться действию агрессивной среды.

Интенсивность изменения потенциала (характеристики) свойства, как видно из выражения (2), будет определяться также величиной $\alpha/\Delta L$. Чем больше $\alpha/\Delta L$, тем интенсивнее происходит изменение. Тогда, по принятой в физике терминологии, эту величину назовем проводимостью, а обратную величину $\alpha/\Delta L$ – сопротивлением. Чем больше сопротивление изменению потенциала (характеристики) свойства, тем меньше это свойство меняется. С учетом изложенных выводов выражение (2) можно представить как

$$\Delta B = \frac{\Delta U}{R}, \quad (3)$$

где $R = \Delta L/\alpha$ – сопротивление изменению потенциала (характеристики) свойства.

Следует отметить, что выражение (3) находит применение при характеристике электропроводимости, тепломассопереноса и других процессов. Однако, как ранее уже отмечалось, строительный материал также обладает ресурсами, средствами (потенциалом), необходимыми для его эксплуатации. Под воздействием окружающей среды эти ресурсы и средства могут претерпевать изменения. В нашем случае выражение (3) позволяет понять, как быстро меняется потенциал свойства материала за любой бесконечно малый промежуток времени. Для определения изменения при длительном воздействии необходимо просуммировать изменения за бесконечно малые промежутки времени в зависимости от факторов, которыми определяются ΔU и R . При изучении действий агрессивных сред на материалы такими факторами являются их проницаемость, способность подвергаться коррозии, размеры изделий.

В выражениях (2) и (3) характерный размер ΔL может принимать различные значения. При $\Delta L \rightarrow 0$ имеет место взаимодействие составляющих во всем объеме с одинаковой скоростью, определяющей изменение состояния системы в это время. Такое взаимодействие наблюдается, например, когда реакция протекает во внутренней кинетической области [5]. Она находит быструю реализацию для проницаемых, но с достаточной химической стойкостью полимербетонов [6, 7]. Как показали наши исследования, для таких бетонов максимальное снижение прочности в агрессивной среде происходит также в начальное время выдержки и оно тем больше, чем прочнее был материал изначально. Затем происходит замедление снижения прочности.

Движущей силой процесса снижения прочности является возможное изменение потенциала (характеристики) свойства материала, а сопротивляющиеся факторы – это степень инертности материала и физико-химические процессы, тормозящие взаимодействие. Представим возможное изменение потенциала свойства материала ΔU как

$$\Delta U = U_t - U_{\text{lim}}, \quad (4)$$

где U_t – величина потенциала свойства в любой момент времени t ; U_{lim} – предельное значение потенциала, уменьшение которого приводит к потере материалом эксплуатационного свойства.

Если под влиянием окружающей среды происходит уменьшение U_t , то согласно выражению (4) уменьшается и ΔU . А поскольку изменение характеристики свойства материал ΔB за любой малый промежуток времени Δt пропорционально ΔU , то со временем, при стабилизации R , это изменение (уменьшение) замедляется. Очевидно, что чем больше возможное изменение состояния материала (системы) и меньше его (ее) сопротивляемость изменяющим процессам, тем эффективнее направленное воздействие. Данное положение применимо не только к внешним, но и к внутренним воздействиям, например, изменение состояния системы введением добавок.

Известно, что при отвердевании цементных бетонов реализуется внутренняя кинетическая область, как и при действии агрессивных сред на хорошо проницаемые, но химически стойкие материалы. Если за потенциал свойства принять средства, источники, которые обеспечивают жесткость бетонной смеси и характеризуют энергию уплотнения, то можно констатировать, что чем больше расходуется энергии при данном способе на уплотнение бетонной смеси, тем выше эффект от применения пластифицирующих добавок. Это утверждение согласуется с результатами исследований [8], показавшими, что эффективность добавок пластификаторов возрастает с увеличением жесткости смеси изначально. Вместе с тем следует заметить, что нельзя говорить о потенциале свойства (жесткости), если уплотнение смеси без добавки вообще невозможно данным способом, т.е. потенциал свойства должен выражаться конкретным значением, например временем уплотнения бетонной смеси.

Примем за возможный потенциал прочности бетона количество связей, которые могут образовываться при отвердевании материала. Пусть со временем бетоны отвердевают до равной прочности. Очевидно, что скорость набора прочности бетонами будет определяться как внутренним их содержанием, так и условиями внешней среды. Эти факторы могут ускорять или замедлять упрочнение бетона, т.е. оказывать ему сопротивление различной степени, которое косвенно характеризуется временем до

набора материалом необходимой прочности. Чем больше сопротивление, тем меньше упрочнение материала за любой промежуток времени и больше требуется времени до набора бетоном необходимой прочности. Согласно [9, 10], эффект от действия добавок ускорителей твердения, в частности хлорида кальция, будет находиться в пропорциональной зависимости от этого времени. Оно будет значительно меньше с увеличением возраста бетона при применении быстротвердеющего портландцемента, при повышении температуры смеси.

Ускорение твердения бетона при введении хлорида кальция наблюдается и в тех случаях, когда он выдерживается при температуре ниже обычной, при этом относительный прирост прочности часто даже возрастает [9]. Объяснить это можно тем, что с понижением температуры смеси увеличиваются сроки до набора бетоном необходимой прочности, т.е. возрастает сопротивление цементной системы своему изменению, и добавление хлорида кальция в этих случаях более эффективно.

Таким образом, чем больше сопротивление системы своему изменению, тем эффективнее введение добавок, направленное на его уменьшение. Так как применение быстротвердеющего цемента и нагревание бетонной смеси уже снижают сопротивление отвердеванию, особенно в начальное время, то и использование ускорителей твердения в этих случаях менее эффективно.

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что воздействие на материал, в том числе и внутреннее (действие добавок и т.д.), в любой момент времени будет оказывать тем большее влияние на силу процесса по изменению потенциала свойства, чем больше возможное изменение потенциала и меньше сопротивление ему материала в это время.

В табл. 2 представлены результаты исследования по определению влияния физико-химического сопротивления полимербетонов и их начальной прочности на ее изменение при выдержке в 15 % NaOH. При этом начальную прочность полимербетонов и их физико-химическое сопротивление изменяли путем введения добавок в составы. Содержание добавок было одинаковым и равным 1,6 % по массе.

Т а б л и ц а 2

Изменение прочности полимербетонов при выдержке в 15 % NaOH
в зависимости от ее начальных значений и показателей сопротивления
(глубины коррозии и массосодержания)

№ п/п	Соотношение показателей начальной прочности и сопротивления	Наличие вида добавки в составах	$\sigma_{пч}$, МПа	Показатели прочности и сопротивления в зависимости от t , сут					
				7			14		
				$\sigma_{т}$, МПа	Показатели сопротивлен.		$\sigma_{т}$, МПа	Показатели сопротивлен.	
	L_k , mm	$\Delta m/m$, %		L_k , mm	$\Delta m/m$, %				
1	Примерно равные показатели начальной прочности и разные сопротивления	Al ₂ O ₃	63,0	41,9	1,7	0,7	28,9	2,3	0,83
		Al ₂ O ₃ для хроматографии	63,0	21,5	3,0	2,0	5,2	7,9	2,4
		Активиров. уг.	53,8	37,7	1,6	0,7	27,7	2,8	1,1
		Мусковит	55,8	27,9	1,8	1,0	20,4	3,5	1,6
2	Примерно равные показатели начальной прочности и сопротивления	Силикагель	56,3	30,6	2,0	0,7	20,5	2,8	1,1
		Оксид титана	57,1	31,5	1,8	0,7	19,9	3,0	1,0
3	Разные показатели начальной прочности и примерно равные сопротивления	Цеолит (CaA)	75,9	50,6	1,8	0,6	41	2,5	1,1
		Биотит	58,5	37,8	2,0	0,7	28,7	2,7	0,95
4	Разные показатели начальной прочности и сопротивления	Цеолит (MgO)	81,6	53,9	1,4	2,0	44,8	1,8	0,83
		Катионит (КУ-2-20)	39,9	16,2	4,1	0,68	4,8	8,0	3,7
		Al ₂ O ₃ для хром.	63,0	21,5	3,0	2,0	5,2	7,9	2,4
		Без добавки	44,5	27,4	2,8	0,56	7,8	3,4	1,5

Исследованию подвергали следующие составы полимербетонов (% по массе соответственно для составов без добавки и с добавками): полиэфирная смола ПН-1 – 16,3 и 16,2; кварцевый песок – 81,9 и 80,4; гипериз – 0,6 и 0,6; нафтенат кобальта – 1,2 и 1,2; добавка – 0 и 1,6. Сопротивление полимербетонов воздействию 15 %-го NaOH косвенно характеризовали глубиной коррозии (L_k) и изменением массосодержания образцов ($\Delta m/m$) при выдержке в агрессивной среде. Кроме того, исследуемые составы полимербетонов в зависимости от начальной прочности и показателей сопротивления агрессивной среде подразделены на четыре группы (табл. 2).

Анализ результатов исследования, приведенных в табл. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы:

- при равной прочности бетонов её изменение в агрессивных средах определяется сопротивлением воздействию: чем больше сопротивление, тем меньше потеря прочности;
- при равном сопротивлении бетонов чем больше начальная прочность, тем больше, при равенстве относительных показателей прочности, её изменение в агрессивных средах;
- чем меньше сопротивление и больше начальная прочность бетонов, тем больше ее изменение в результате воздействия агрессивной среды.

Очевидно, что увеличение прочности композита в целях повышения эффективности работы в агрессивных средах целесообразно в тех случаях, когда сохраняется, а еще лучше повышается сопротивляемость его воздействиям. Принимая во внимание, что изменение прочностной характеристики, в данном случае – предела прочности при сжатии, является следствием изменения потенциала свойства – прочности, можно заключить: при воздействиях чем больше возможное изменение (падение или увеличение) потенциала свойства материала и меньше сопротивление этому изменению, тем оно (изменение) больше за любой соответствующий промежуток времени, и наоборот.

Список литературы

1. Шестаков, А.А. Курс высшей математики: учебник для студентов вузов / А.А. Шестаков, И.А. Малышева, Д.П. Полозков. – М.: Высшая школа, 1987. – 320 с.
2. Новый энциклопедический словарь. – М.: Большая Российская энциклопедия: Рипол классик. 2007. – 1456 с.
3. Федорцов, А.П. Позитивная коррозия бетонов как предпосылка улучшения их свойств агрессивными воздействиями / А.П. Федорцов // Вестн. Морд. ун-та. – 2002. – № 1–2. – С. 152–156.
4. Федорцов, А.П. Условия твердения и химическое сопротивление цементного камня / А.П. Федорцов, Л. М. Ошкина // Предотвращение аварий зданий и сооружений: межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 2. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – С. 221–229.
5. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1967. – 491 с.
6. Ерофеев, В.Т. Каркасные строительные композиты: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Т. Ерофеев. – М., 1993. – 51 с.
7. Федорцов, А.П. Исследование химического сопротивления и разработка полиэфирных полимербетонов, стойких к электролитам и воде: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.П. Федорцов. – Л., 1981. – 20 с.
8. Венюа, М. Цементы и бетоны в строительстве: пер. с франц. / М. Венюа. – М.: Стройиздат, 1980. – 415 с.
9. Добавки в бетон: справочное пособие: пер. с англ. / под ред. В.С. Рамачандрана. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
10. Рамачандран, В. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.

References

1. Shestakov, A.A. Course of higher mathematics: textbook for students of colleges / A.A. Shestakov, I.A. Malyshev, D.P. Polozkov. – M.: Vysshaya school, 1987. – 320 p.
2. New encyclopedic dictionary. – M.: Big Russian encyclopedia: reepol classic. 2007. – 1456 p.
3. Fedortsov, A.P. Positive corrosion of concrete as a prerequisite for improving their properties aggressive actions / A.P. Fedortsov // Vestn. Mord. Univ. – 2002. – № 1–2. – P. 152–156.
4. Fedortsov, A.P. Conditions of hardening and chemical resistance of cement stone / A.P. Fedortsov, L.M. Oshkina // Prevention of accidents of buildings and constructions: collected scientific articles. – Vol. 2. – Magnitogorsk. – M., 2002. – P. 221–229.
5. Frank-Kamenetsky, D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics / D.A. Frank-Kamenetsky. – M.: Nauka, 1967. – 491 p.
6. Erofeev, V.T. Frame construction composites: avtoref. dis... doctrine. tehn. Sciences / V.T. Erofeev. – M., 1993. – 51 p.
7. Fedortsov, A.P. Study of chemical resistance and the development of polyester-resistant polymer concretes electrolytes and water: avtoref. dis... Cand. tehn. Sciences / A.P. Fedortsov. – L., 1981. – 20 p.
8. Venua, M. Cements and concretes in construction: per. s FR / M. Venua. – M.: Stroyizdat, 1980. – 415 p.
9. Concrete admixtures: a reference manual : per. s angl. / ed. V. Ramachandran. – M.: Stroyizdat, 1988. – 575 p.
10. Ramachandran, V. Science of concrete: Physico-chemical concrete study / V. Ramachandran, R. Feldman, J. Baudouin; translated from English. – M.: Stroyizdat, 1986. – 278 p.

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел.: (8342) 48-25-64

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

Юркин Юрий Викторович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Прикладная механика»
E-mail: yurkinuv@gmail.com

Авдонин Валерий Викторович,
аспирант кафедры «Прикладная механика»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 48-25-64

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

Yurkin Yuriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Applied mechanics»
E-mail: yurkinuv@gmail.com

Avdonin Valeriy Viktorovich,
Postgraduate of the department «Applied
mechanics»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ, ЭФФЕКТИВНО РАБОТАЮЩИЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР*

В.Д. Черкасов, Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин

Представлены результаты исследований динамических свойств разработанного вибропоглощающего покрытия на основе бутилкаучука. Отмечена эффективность применения нового материала в диапазоне отрицательных температур по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: вибропоглощение, вибропоглощающие покрытия, бутилкаучук, температурный диапазон.

DAMPING SHEETS WITH WIDE WORKING TEMPERATURE RANGE

V.D. Cherkasov, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin

In this paper the research results of dynamic properties of damping sheets on the basis of butyl rubber are presented. From the analysis of existing damping sheets it follows that new material is much more effective in the range of negative temperatures.

Keywords: damping, damping sheet, butyl rubber, temperature range.

С увеличением скоростей на транспорте все более актуальной становится проблема борьбы с вибрациями и вызываемыми ими шумами. Одним из наиболее распространенных методов снижения уровней вибраций является использование вибропоглощающих покрытий [1, 2]. В настоящее время в качестве вибропоглощающих покрытий применяются армированные покрытия с прослойкой на основе битума. Битумные покрытия обладают недостаточными пластичностью, стойкостью к ударным нагрузкам и резким колебаниям температуры. У битумных покрытий максимум потерь приходится на температуру плюс 20–30 °С. При температуре плюс 60 °С потери у таких покрытий снижаются в три раза, а при температуре минус 20 °С коэффициент потерь достигает величины менее 0,1; т.е. практически покрытие перестает гасить

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.527.12.0007 от 11.10.2011 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

вибрации. Таким образом, битумные покрытия имеют незначительный температурный диапазон эффективной работы.

В настоящее время необходимы вибропоглощающие материалы, эффективные в температурном интервале от минус 70 °С до плюс 100 °С. Для создания вибропоглощающего материала с максимальными потерями колебательной энергии в области температур ниже 0 °С в качестве демпфирующего слоя следует применять материал, который при комнатной температуре находится в высокоэластичном состоянии. Тогда температурная область перехода материала из высокоэластичного состояния в стеклообразное, характеризуемая высокими значениями механических потерь, приходится на диапазон температур ниже 0 °С. Таким материалом является каучук. Он обладает адгезией к материалам, маслостойкостью и относительной негорючестью. В качестве основы вибропоглощающего слоя покрытия был выбран бутилкаучук марки БК-1675Н. Для регулирования вибропоглощающих свойств каучука использовали пластификаторы. Количество пластификатора и изменение температуры стеклования связаны пропорциональной зависимостью [3]. Для пластифицирования каучука применяли индустриальное масло И-20А и битум БН-90/10. Кроме того, на температуру стеклования оказывают влияние наполнители [4, 5].

Путем изменения состава композиции была получена высокоэластичная мастика, температура стеклования ее составляет минус 70 °С; были разработаны составы, у которых температура стеклования минус 90 °С. На основе этой мастики были сделаны вибропоглощающие покрытия толщиной от 2 до 4 мм. В качестве армирующего покрытия применялась алюминиевая фольга толщиной 100 мкм. Основные физико-механические свойства вибропоглощающего покрытия приведены в таблице.

Физико-механические свойства высокоэластичной мастики

Наименование показателя	Значение
Прочность связи с металлом при отслаивании, Н/м, не менее	от 600 до 1000
Пенетрация, мм	от 3 до 10
Сопrotивление текучести при 160 °С, 2 ч, мм, не более	2
Коэффициент вибропоглощения на частоте 200 Гц	от 0,1 до 0,4
Масса 1 м ² , кг	от 2 до 7
Температурный интервал оптимальной работы	от –40 до +60°С

Исследования демпфирующих свойств вибропоглощающих покрытий на основе высокоэластичной мастики при отрицательных и положительных температурах показали, что коэффициент потерь покрытия при температурах от минус 40 °С до плюс 40 °С изменяется незначительно (рис.1).

Область эффективного поглощения смещается в сторону низких температур и имеет максимальное значение при температуре, близкой к температуре стеклования. У этого типа вибропоглощающих покрытий в изученном диапазоне температур не наблюдается экстремального изменения коэффициента потерь по сравнению с битумными покрытиями, которые при температуре ниже 0 °С и выше плюс 40 °С становятся неэффективными вибропоглощающими покрытиями.

Сделано сравнение работы различных вибропоглощающих покрытий в широком температурном диапазоне [6–9]. Результаты исследований приведены на рис. 2. Как видно из рис. 2, разработанное покрытие выгодно отличается от отечественных и некоторых зарубежных вибропоглощающих покрытий стабильным вибропоглощением в температурном диапазоне от минус 40 °С до плюс 60 °С.

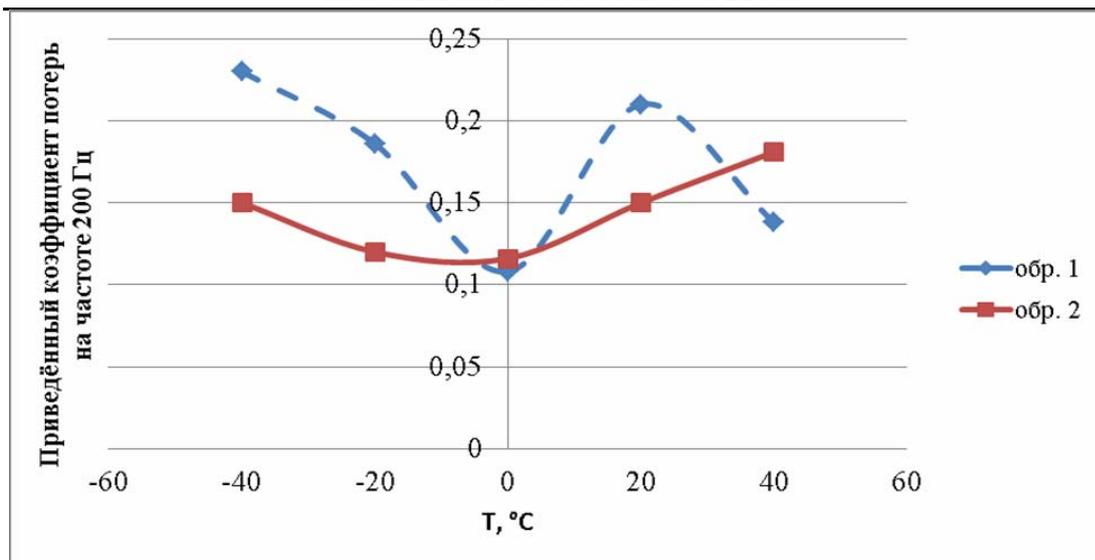


Рис. 1. Влияние температуры на вибропоглощающие свойства покрытия

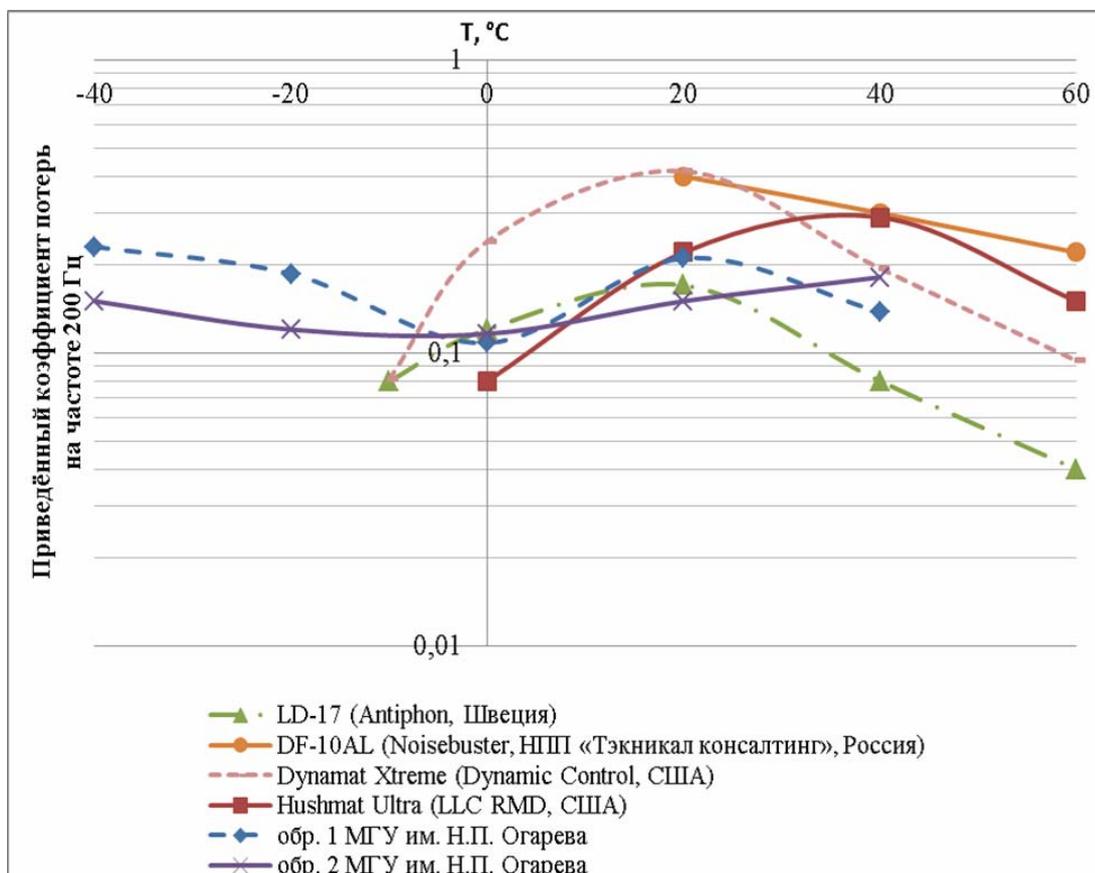


Рис. 2. Зависимость коэффициента потерь от температуры разработанного покрытия и аналогов [6–9]

Кроме того, разработанное вибропоглощающее покрытие на основе бутилкаучука является самоклеющимся и имеет низкую массу по сравнению с аналогами.

Список литературы

1. Никифоров, А.С. Состояние и тенденции применения средств вибропоглощения в промышленности и на транспорте для защиты человека от вредного влияния вибрации и шума / А.С. Никифоров // Применение средств вибропоглощения и вибро-

гашения в промышленности и на транспорте: материалы краткосрочного семинара (Ленинград, 13-14 марта 1984 г.) – Л., 1984. – С. 6–10.

2. Иванов, Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н.И. Иванов. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.

3. Cherkasov, V.D. Plasticization peculiarities of vibration damping composite materials on the basis of elastomers / V.D. Cherkasov, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin // Nauka i studia: Przemysł, «Nauka i studia». – 2012. – P. 99–103.

4. Черкасов, В.Д. Прогнозирование демпфирующих свойств композита с учетом температурной зависимости свойств полимера / В.Д. Черкасов, Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин // Вестн. Томского гос. архит.-строит. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 216–225.

5. Комова, Н.Н. Особенности принципа температурно-временной эквивалентности в полиэтилене низкой плотности, наполненном шунгитом / Н.Н. Комова [и др.] // Вестн. МИТХТ им. М.В. Ломоносова. – 2013. – Т. 8. № 1. – С. 24–35.

6. Structure-borne sound damping pads [Электронный ресурс] // Antiphon AB. Åmotfors, Sweden. – URL: http://www.antiphon.se/noise-reduction/antiphon_id_engelsk09_id346.pdf. (Дата обращения: 02.10.2013).

7. Dynamat xtreme [Электронный ресурс] // Dynamic Control of North America, Inc. Hamilton, USA. – URL: http://www.dynamat.com/technical_specs_dynamat_xtreme.html. (Дата обращения: 02.10.2013).

8. Hushmat ultra [Электронный ресурс] // Speedway Motors, Inc Lincoln, USA. – URL: http://static.speedwaymotors.com/pdf/Hushmat_Ultra.pdf. (Дата обращения: 02.10.2013).

9. DF-10AL (Damping faced 10AL) [Электронный ресурс] // Noisebuster. – М. – URL: <http://www.noisebuster-msk.ru/>. (Дата обращения: 02.10.2013).

References

1. Nikiforov, A.C. Condition and tendencies of application of means of vibration damping in the industry and on transport for protection of the person against an adverse effect of vibration and / A.C. Nikiforov // Application of means of vibration damping and vibroclearing in the industry and on transport: mater. short-term seminar (Leningrad, 13-14 March 1984). – L., 1984. – P. 6–10.

2. Ivanov, N. And. Engineering acoustics. Theory and practice of fight against noise: Textbook. – M: University book, Lagos, 2008. – 424 p.

3. Cherkasov, V.D. Plasticization peculiarities of vibration damping composite materials on the basis of elastomers / V.D. Cherkasov, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin // Nauka i studia: Przemysł, «Nauka i studia» – 2012 – P. 99–103.

4. Cherkasov, V.D. Forecasting of damping properties of composite according to the temperature dependences of polymer properties / V.D. Cherkasov, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin // Vestnik of TSUAB. – 2012. – № 4. – P. 216–225.

5. Komova, N.N. Specific features of the principle of the time-temperature superposition in low density polyethylene filled with shungite / N.N. Komova [etc.] // Vestn. MITHT of M.V. Lomonosov. – 2013. – Т. 8, № 1. – P. 24–35.

6. Structure-borne sound damping pads [Electronic resource] // Antiphon AB. Åmotfors, Sweden. – URL: http://www.antiphon.se/noise-reduction/antiphon_id_engelsk09_id346.pdf. (Address date: 02.10.2013).

7. Dynamat xtreme [Electronic resource] // Dynamic Control of North America, Inc. Hamilton, USA. – URL: http://www.dynamat.com/technical_specs_dynamat_xtreme.html. (Address date: 02.10.2013).

8. Hushmat ultra [Electronic resource] // Speedway Motors, Inc Lincoln, USA. – URL: http://static.speedwaymotors.com/pdf/Hushmat_Ultra.pdf. (Address date: 02.10.2013).

9. DF-10AL (Damping faced 10AL) [Electronic resource] // Noisebuster. – М. – URL: <http://www.noisebuster-msk.ru/>. (Address date: 02.10.2013).

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

Ерошкина Надежда Александровна,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник научно-исследовательского сектора
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Коровкин Марк Олимпиевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: m_korovkin@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

Eroshkina Nadezda Alexandrovna,
Candidate of Sciences, senior researcher
of scientific and research sector
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Korovkin Mark Olimpiyevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technolgy of building
materials and wood processing»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

МЕХАНИЗМ ТВЕРДЕНИЯ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД*

Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин

Приводится анализ механизма структурообразования геополлимерных вяжущих, приготовленных на основе измельченных горных пород с добавкой доменного шлака. Показано, что на начальных этапах твердения роль горных пород заключается преимущественно в снижении усадочных деформаций, а их химическая активность проявляется в поздние сроки..

Ключевые слова: геополлимер, структурообразование, вяжущее, магматическая горная порода, доменный шлак.

STRUCTURE FORMATION MECHANISM OF GEOPOLYMER BINDERS, PREPARED ON THE BASIS OF CRUSHED ROCK

N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin

The analysis of the structure formation mechanism of geopolymer binders, prepared on the basis of crushed rock with the addition of blast furnace slag is presented. It is shown that in the initial stages of hardening of the role of the rock is mainly to reduce the shrinkage strain, and their chemical activity is apparent in the later stages.

Keywords: geopolymer, structure, astringent, an igneous rock, blast furnace slag.

Различными исследователями установлено, что в качестве сырья для производства геополлимерных вяжущих материалов строительного назначения могут быть использованы измельченные магматические горные породы алюмосиликатного состава [1-3]. Эти вяжущие способны твердеть и набирать прочность как при тепловлажностной обработке, так и в нормальных условиях. Перспективными для получения вяжущих считаются более активные при взаимодействии со щелочными активаторами излившиеся (вулканические) породы, однако на основе глубинных пород также были получены вяжущие с достаточно высокими характеристиками.

Многие аспекты твердения геополлимерного вяжущего на основе магматических горных пород исследованы далеко не полностью [1]. Сложность изучения механизма структурообразования геополлимерных материалов объясняется отсутствием достоверных экспериментальных методик идентификации процессов, протекающих при

* При финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым № СП-858.2012.1.

твердении этих вяжущих. Кроме того, в научно-технической литературе крайне мало данных о влиянии различных факторов на свойства геополимерных вяжущих на основе магматических горных пород.

В работе [1] отмечается, что в основе механизма структурообразования геополимеров лежат следующие химические реакции:

- начальное взаимодействие алюмосиликатов со щелочью, при котором образуется четырехвалентный Al в боковой группе силатов $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-(\text{OH})_3-\text{Na}^+$;
- растворение щелочи с добавлением к атомам кремния гидроксильных групп OH^- , в результате чего увеличивается валентность электронов до пятиковалентного состояния;
- отщепление кислорода, содержащегося в силоксане $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$, путем передачи электрона от Si к O с образованием, с одной стороны, промежуточных силановых групп $\text{Si}-\text{OH}$ и, с другой – основных силоксаногрупп $\text{Si}-\text{O}-$;
- образование силановых групп $\text{Si}-\text{OH}$, которые формируют первичные зародыши геополимеров, состоящие из ортосилатов;
- взаимодействие основных соединений $\text{Si}-\text{O}-$ с катионами натрия Na^+ , в результате чего образуются простые (концевые) связи $\text{Si}-\text{O}-\text{Na}$;
- конденсация между ортосилатными молекулами, реакционноактивными группами $\text{Si}-\text{ONa}$ и гидроксоалюминатными группами $\text{OH}-\text{Al}$ с выделением NaOH и образованием циклотрисилатных структур, в результате чего щелочь NaOH высвобождается и снова вступает в реакцию поликонденсации с образованием натрий-полисилатных нефелиновых структур;
- образование ортосилатно-дисилоксановой циклической структуры в присутствии жидкого стекла (растворимый Na-полисиликат) при конденсации молекул дисиликата и ортосиликата, реакционноактивных групп $\text{Si}-\text{ONa}$, $\text{Si}-\text{OH}$ и гидроксоалюминатных групп $\text{OH}-\text{Al}-$, при этом выделяется щелочь NaOH , которая вновь вступает в реакцию;
- дальнейшая поликонденсация альбитной структуры натриевых полисилат-дисилоксановых соединений с образованием типичных полевошпатных цепочных структур.

Многие исследователи соглашались с предложенным механизмом, но вносят отдельные уточнения. В частности, ряд ученых считают, что вначале наблюдается растворение кремния, сопровождаемое фазами преобразования и последующими уплотнениями. Однако такие процессы происходят одновременно, и поэтому сложно идентифицировать отдельные продукты реакции, образующиеся на каждой стадии.

Авторы [2] приходят к выводу, что активация щелочью может быть описана двумя моделями. Первая модель применима к шлакощелочному вяжущему, в котором доменный шлак активируется среднещелочным раствором. В этом случае главными продуктами реакции являются гидросиликаты кальция. По второй модели сильнощелочными растворами активируются алюмосиликатные соединения, такие, как метакаолин, основными оксидами которого являются оксиды Si и Al; при этом полученный материал характеризуется полимерной структурой.

Реализация первой модели предполагает формирование цеолитовой структуры. Таким образом, активация метакаолина позволяет получить аморфный полимер, для которого характерны свойства цеолита. Вначале происходит экзотермический процесс растворения, при котором разрушаются ковалентные связи $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ и $\text{Al}-\text{O}-\text{Al}$. После окончания накопления продуктов реакции они уплотняются в замкнутом пространстве, что обеспечивает высокую прочность материала.

Твердение геополимерных вяжущих на основе магматических горных пород с модифицирующей добавкой может происходить под действием комплексного активатора, включающего метасиликат и гидроксид натрия [3]. В связи со сложным составом такого вяжущего трудно выявить основные процессы, определяющие механизм его структурообразования.

Исследования [4, 5] вяжущих на основе магматических горных пород – базальта, габбро-диабазы, перидотита и гранитов некоторых месторождений, твердевших под действием комплексного щелочного активатора, показали, что свойства вяжущего в значительной степени зависят от состава активатора твердения и дозировки модифицирующей добавки.

Исследованные горные породы, измельченные до удельной поверхности 340-350 м²/кг при активации метасиликатом натрия и гидроксидом натрия в нормальных условиях, не проявляют вяжущих свойств. После тепловлажностной обработки при температуре 60...105 °С в течение 8-10 часов прочность вяжущих достигает 22...37 МПа (рис. 1). Существенным недостатком этих вяжущих является их низкая водостойкость – при длительном насыщении водой их прочность снижается на 65...85 %.

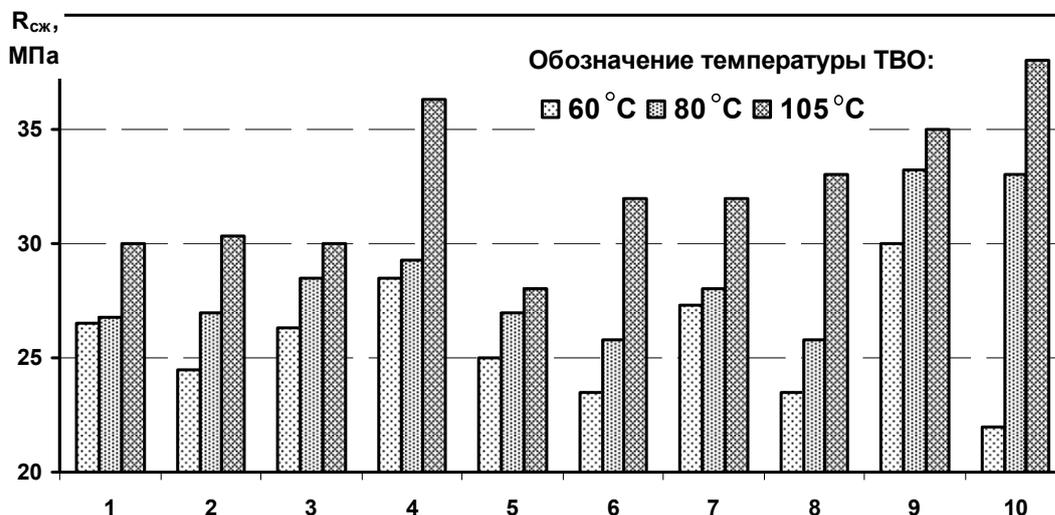


Рис. 1. Прочность вяжущих из горных пород без шлака после тепловой обработки: 1 – гранит Павловский; 2 – гранит Хребетский; 3 – перидотит; 4 – базальт; 5 – гранит розовый; 6 – гранит с роговой обманкой; 7 – гранит биотитовый; 8 – гранит плагиоклазовый; 9 – габбро-диабаз; 10 – дацит

Замещение 25 % горной породы доменным гранулированным шлаком способствует тому, что вяжущее твердеет не только при тепловой обработке, но и в нормальных условиях (рис. 2).

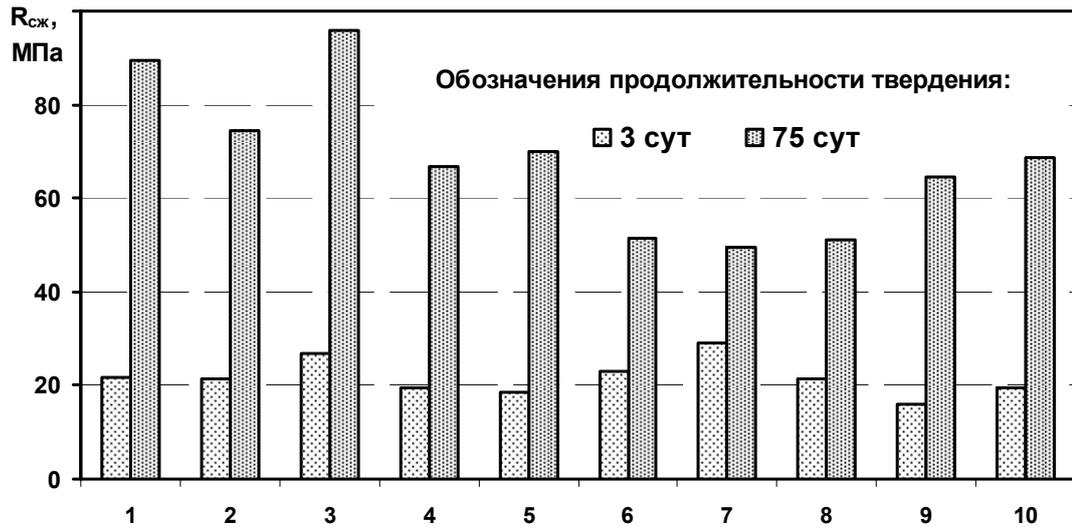
Важным изменением свойств вяжущего, вызванным введением в его состав добавки шлака, является повышение водостойкости. При насыщении водой таких вяжущих в течение 75 суток прочность почти всех составов возрастает (см. таблицу). Это является достоверным доказательством того, что введение добавки шлака приводит к изменению типа вяжущего с воздушного на гидравлический.

Коэффициент размягчения вяжущих через 75 суток насыщения

Модифицирующая добавка	Гранит Павловский	Гранит Хребетский	Перидотит	Базальт	Гранит розовый	Гранит с роговой обманкой	Гранит биотитовый	Гранит плагиоклазовый	Габбро-диабаз	Дацит
Без шлака	0,05	0,16	0,52	0,54	0,28	0,36	0,39	0,3	0,2	0,4
Шлак (25 %)	1,22	1,05	1,25	1,4	1,39	1,29	1,20	1,16	1,02	1,12

Исследования влияния доли шлака в вяжущем на его прочность при твердении в воздушно-влажных условиях и в воде показали, что вяжущее становится гидравлическим уже при расходе шлака более 7...8 %. Увеличение дозировки шлака с 6 до 24 % приводит к линейному росту прочности вяжущего с 10 до 50...70 МПа. Это свидетельствует о важной роли шлака в структурообразовании исследованных вяжущих.

а



б

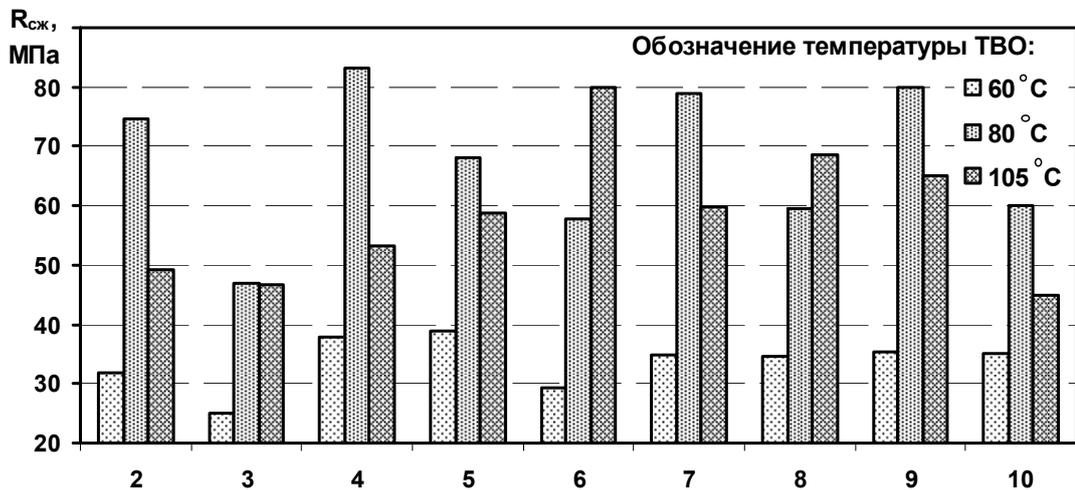


Рис. 2. Прочность вяжущих на основе различных горных пород (обозначения по рис. 1) с добавкой 25 % шлака при твердении в нормальных условиях (а) и при тепловлажностной обработке (б)

Ключевой вопрос изучения механизма структурообразования исследуемого геополлимерного вяжущего, по которому в настоящее время ведется дискуссия, – являются ли измельченные магматические горные породы химически активным компонентом вяжущего или они играют роль заполнителя, основное влияние которого на структурообразование вяжущего заключается в снижении усадки матрицы продуктов реакции шлака и жидкого стекла? Влияние этого фактора может быть велико с учетом высоких значений усадки геополлимерных вяжущих, активированных жидким стеклом [4].

Гипотеза о преобладающем вкладе магматических горных пород в структурообразование вяжущих как наполнителя косвенно подтверждается их большим возрастом – от десятков миллионов до 2...3 млрд лет, что характеризует эти породы с точки зрения технологии строительных материалов как химически инертные компоненты.

Если рассматривать исследованные магматические породы как инертный компонент, то твердение вяжущего происходит при срастании частиц измельченных горных пород за счет заполнения пространства между ними продуктами реакции шлака и щелочного активатора. При этом на темпы твердения и конечную прочность влияние будет оказывать только повышение удельной поверхности активного компонента –

шлака, а степень измельчения горной породы не будет сказываться на прочностных характеристиках вяжущего. Однако полученные нами экспериментальные данные по влиянию тонкости измельчения компонентов вяжущего на его прочностные характеристики не подтверждают эту гипотезу.

Влияние удельной поверхности горной породы на прочность вяжущего повышается при увеличении продолжительности твердения. Через 28 суток твердения в нормальных условиях прочность практически линейно зависит от удельной поверхности шлака и гранита, хотя влияние тонкости помола горной породы приблизительно в 3 раза меньше.

Экспериментальное определение влияния удельной поверхности различных горных пород со шлаком на прочность вяжущих, твердевших 28 суток в нормальных условиях, показало, что зависимости имеют практически линейный характер (рис. 3). Полученные зависимости свидетельствует о том, что все исследованные породы являются активным компонентом вяжущего, однако их активность в вяжущем значительно различается.

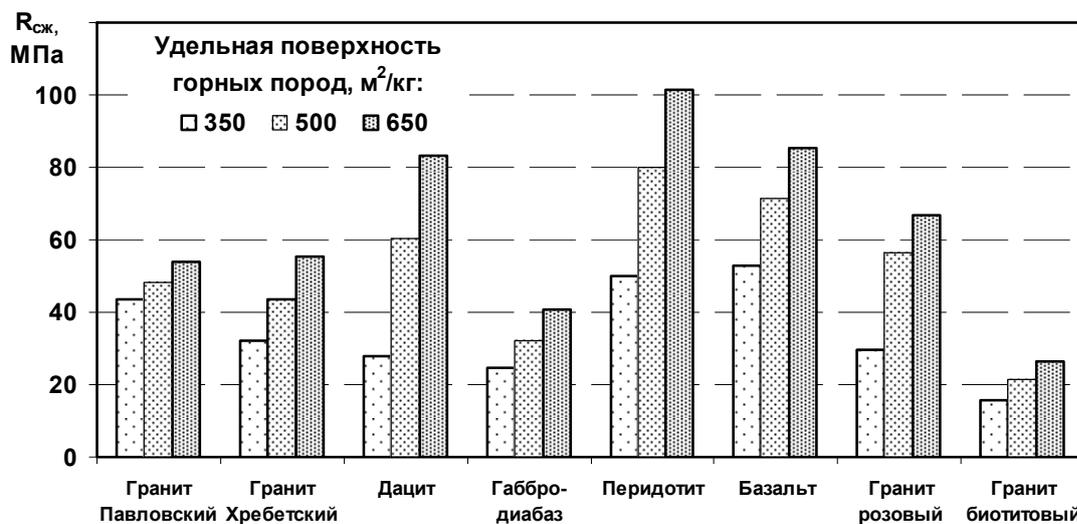


Рис. 3. Зависимость прочности вяжущих при сжатии от удельной поверхности горных пород

Выводы

Магматические горные породы, измельченные до удельной поверхности 200 м²/кг при совместной активации раствором метасиликата и гидроксида натрия, способны твердеть и набирать прочность 22...37 МПа только в условиях тепловой обработки при температурах 60...105 °С. Такие вяжущие не водостойки и характеризуются коэффициентом размягчения 0,1...0,5, что позволяет отнести их к вяжущим воздушного типа.

Получение гидравлического вяжущего, твердеющего в нормальных условиях и при тепловлажностной обработке, возможно при замещении горной породы на 8 % и более доменным шлаком. Увеличение дозировки шлака до 24 % приводит к многократному повышению прочности вяжущего, что характеризует шлак как ключевой компонент в структурообразовании геополимерного вяжущего на основе магматических горных пород.

Установлено, что роль магматической породы на ранних стадиях твердения сводится в основном к снижению усадочных деформаций в матрице продуктов реакции шлака и щелочного активатора. Из-за низкой химической активности горных пород при их взаимодействии с щелочным активатором вклад этого фактора в структурообразование вяжущих проявляется на более поздних стадиях твердения.

Список литературы

1. Davidovits, J. Geopolymer Chemistry and Applications / J. Davidovits. – Saint Quentin, France: Geopolymer Institute, 2008. – 585 p.
2. Palomo, A. Alkali-activated fly ashes. A cement for the future. A cement for the future / A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco // Cement Concrete Res. – 1999. – № 29. – P. 1323–1329.
3. Ерошкина, Н.А. Исследование вяжущих, полученных при щелочной активизации магматических горных пород / Н.А. Ерошкина // Строительство и реконструкция. – 2011. – №1 (33). – С. 61–64.
4. Ерошкина, Н.А. Влияние параметров состава минерально-щелочного вяжущего на прочность и усадку бетона / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин // Вестн. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. – 2012. – Вып. 27 (46). – С. 78–83.
5. Ерошкина, Н.А. Влияние минерального состава магматических горных пород на активность геополимерного вяжущего / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, С.В. Аксенов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 1. – С. 84–89.

References

1. Davidovits, J. Geopolymer Chemistry and Applications / J. Davidovits. – Saint Quentin, France: Geopolymer Institute, 2008. – 585 p.
2. Palomo, A. Alkali-activated fly ashes. A cement for the future / A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco // Cement Concrete Res. – 1999. – № 29. – P. 1323–1329.
3. Eroshkina, N.A. Research of binders, magmatic rocks received at alkaline activization / N.A. Eroshkina // Building and reconstruction. – 2011. – №1. – P. 61–65.
4. Eroshkina, N.A. The influence of parameters of mineral alkaline binder composition on the strength and shrinkage of concrete / N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin // Vestnik VolgGASU. – 2012. – № 27. – P. 78–83.
5. Eroshkina, N.A. The influence of magmatic rocks mineral composition on the activity of geopolymer binder / N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin, S.V. Aksenov // Regional architecture and engineering. – 2013. – № 1. – P. 84–89.

УДК 621.763-036.674

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел.: (8342) 48-25-64

Мышкин Антон Владимирович,
аспирант кафедры «Строительные
материалы и технологии»
E-mail: antonym@pisem.net

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Строительные материалы
и технологии»
E-mail: yarofeevvt@mail.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 48-25-64

Myshkin Anton Vladimirovich,
Postgraduate of the department
«Building materials and technologies»
E-mail: antonym@pisem.net

Yerofeev Vladimir Trofymovich,
doctor of sciences, professor, Head
of the department «Building materials
and technologies»
E-mail: yarofeevvt@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ПОЛИЭФИРАКРИЛАТНЫХ КОМПОЗИТОВ

А.В. Мышкин, В.Т. Ерофеев

Приводятся результаты оптимизации состава композитов на основе олигоэфиракрилата марки МГФ-9 по критериям прочности на сжатие и изгиб методами математического планирования эксперимента. В результате исследований получены составы композитов повышенной прочности с применением новой отверждающей системы: пероксида циклогексанона и октоата кобальта. При оптимальном содержании компонентов достигнута прочность на сжатие более 100 МПа, а введение в состав наполнителей оптимального гранулометрического состава позволило сократить расход полимерного связующего.

Ключевые слова: олигоэфиракрилат МГФ-9, оптимизация, инициатор отверждения, ускоритель отверждения, прочность, гранулометрический состав наполнителя.

STRUCTURE OPTIMIZATION OF POLYESTERACRYLATE COMPOSITES

A.V. Myshkin, V.T. Yerofeev

The article provides the results of the optimization of composition of composites based on the oligoester acrylate MGF-9 according to the criteria of compressive strength and flexural strength by means of mathematical methods of experiment planning. Due to the current research we have got composition of composites of increased strength with the application of a new curing system: cyclohexanone peroxide and cobalt octoate. With the desired content of components the compressive strength of 100 MPa was achieved, and the incorporation of fillers with the optimal granulometric composition allowed to lower the expenditure of the polymer binder.

Keywords: oligoester acrylate MGF-9, optimization, cure initiator, cure accelerator, strength, granulometric composition of the filler.

В Российской Федерации освоен промышленный выпуск большой группы синтетических смол, которые используются для изготовления различных строительных материалов. Многие виды полимерных вяжущих имеют небольшую начальную вязкость, хорошо смачивают поверхность минеральных наполнителей и заполнителей и образуют с ними прочные композиции, обладающие высокой плотностью, прочностью, химической стойкостью, высоким электрическим сопротивлением и другими положительными свойствами [4, 5]. К таким вяжущим относятся полиэфиракрилатные смолы, которые наряду с эпоксидными, фурановыми и карбамидными связующими могут быть использованы для изготовления полимеррастворов и полимербетонов [1]. По сравнению с эпоксидными и фурановыми смолами полиэфиракрилатные смолы, относящиеся к полиэфирным связующим, являются менее изученными.

Цель исследований заключалась в подборе оптимального состава отверждающей системы и гранулометрического состава наполнителей для получения полиэфиракрилатных композитов с улучшенными прочностными показателями. При выполнении исследований в качестве вяжущего рассматривался олигоэфиракрилат марки МГФ-9, для отверждения смолы использовались отвердитель – пероксид циклогексанона (ПЦОН-2) и ускоритель твердения – октоат кобальта (ОК-1), а наполнителем служил кварцевый песок разной крупности. Для получения модельных смесей наполнителя применяли молотый кварцевый песок Смольненского месторождения (Республика Мордовия) следующих фракций: 0,63-0,315, 0,315-0,16, 0,16-0,08 мм. Химический состав песка включает: 91,93 % SiO₂, 5,36 % Fe₂O₃, 0,56 % Al₂O₃, 0,04 % CaO, 0,9 % MgO, 0,21 % других соединений. Приготовление составов осуществлялось вручную. Образцы изготавливались в металлических формах, которые перед укладкой смеси смазывались парафином. После укладки смеси твердели в нормальных условиях 1 сутки в формах, а затем образцы проходили термообработку в термошкафе с температурой прогрева 80 °С в течение 6 ч. Физико-механические свойства полимерных композиций определялись на образцах в виде призм размером 1×1×3 см. Испытания проводились на прессе с записью диаграммы «нагрузка – деформация». Обработка результатов осуществлялась в программном комплексе FACTOR.

Исследования проведены с применением математических методов планирования эксперимента. Для оптимизации состава отверждающей системы использована матрица планирования (план Коно), состоящая из 9 опытов. В качестве факторов варьирования рассматривались содержание ускорителя твердения (X₁) и отвердителя (X₂), а в качестве оптимизируемых параметров – прочность композитов на сжатие и изгиб. Уровни варьирования факторов были приняты: 3,2 %, 4,4 %, 5,6 % (по количеству ускорителя), 0,4 %, 1,6 %, 2,8 % (по количеству отвердителя) при исследовании прочности на сжатие. При исследовании прочности на изгиб были приняты другие интервалы: 2 %, 3,2 %, 4,4 % (по количеству ускорителя), 0,4 %, 1,6 %, 2,8 % (по количеству отвердителя).

Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	Матрица планирования		Рабочая матрица на сжатие/на изгиб, мас. ч. на 100 мас. ч. смолы		Прочность, МПа	
	X ₁	X ₂	Содержание ОК-1	Содержание ПЦОН-2	при сжатии	при изгибе
1	-1	-1	3,2/2,0	1,6	144,4	63
2	0	-1	4,4/3,2	1,6	135,2	63,9
3	+1	-1	5,6/4,4	1,6	139,2	59,9
4	-1	0	3,2/2,0	2,8	173,4	100,4
5	0	0	4,4/3,2	2,8	178	80,9
6	+1	0	5,6/4,4	2,8	163,6	88,7
7	-1	+1	3,2/2,0	4	143,3	89,5
8	0	+1	4,4/3,2	4	172,4	93,2
9	+1	+1	5,6/4,4	4	173	99,2

П р и м е ч а н и е . В числителе содержание октоата кобальта при исследовании прочности на сжатие, в знаменателе – прочности на изгиб.

Статистическая обработка результатов эксперимента позволила получить зависимости изменения прочности при сжатии (Y₁) и при изгибе (Y₂) полиэфиракрилатных композитов от количества компонентов отверждающей системы:

$$Y_1 = 175,5 - 4,92X_1 + 18,6X_2 - 5,72X_1^2 + 8,73X_1X_2 - 20,44X_2^2 - 10,43X_1^2X_2 + 11,05X_1X_2^2;$$

$$Y_2 = 93,442 - 7,695X_1 + 8,03X_2 - 1,378X_1^2 + 4,5 \times X_1X_2 - 18,963X_2^2 - 4,585X_1^2X_2 + 4,74X_1X_2^2.$$

По уравнениям регрессии были построены графики в изолиниях исследуемых показателей (рис. 1).

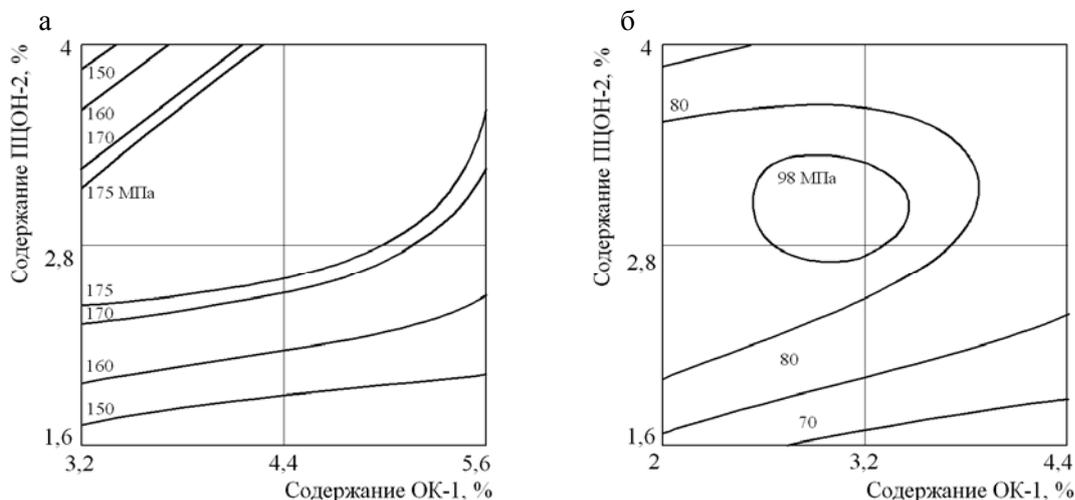


Рис. 1. Зависимости пределов прочности композитов при сжатии (а), при изгибе (б) от содержания отвердителя и ускорителя твердения

Анализируя полученные графики, можно выделить следующие составы отверждающей системы для получения композитов с максимальной прочностью на сжатие: олигоэфиракрилат марки МГФ-9 – 100 мас. ч., отвердитель ПЦОН-2 – 2 мас. ч., ускоритель твердения ОК-1 – 4,6 мас. ч.; с максимальной прочностью при изгибе: олигоэфиракрилат марки МГФ-9 – 100 мас. ч., отвердитель ПЦОН-2 – 3 мас. ч., ускоритель твердения ОК-1 – 3 мас. ч. Материалы с повышенным содержанием отверждающей системы хуже сопротивляются изгибающим нагрузкам, что, по-видимому, объясняется увеличением концентраций напряжений в структурных сетках композита, сказывающемся в большей мере на прочности при изгибе [3].

Важное значение имеют исследования, направленные на установление количественных зависимостей изменения свойств материалов от степени наполнения для конкретных связующих. Известно, что с увеличением концентрации наполнителя происходит рост прочности композитов до определенного предела, после чего она падает, что связано с нехваткой связующего на полное смачивание частиц наполнителя. В результате этого монолитность смеси нарушается, растет объем пустот в композите, и, как следствие уменьшается его плотность [2]. Если частицы смачиваемых фракций наполнителя значительно различаются по размерам, то размер мелких частиц может оказаться больше, чем размер пустот между крупными частицами, и мелкие частицы несколько раздвинут крупные. В результате коэффициент упаковки всей системы может не только не увеличиться, но даже уменьшиться. Экспериментальные данные показывают, что применение наполнителя из смеси различных фракций, подобранной по специальным расчетам прерывистой или непрерывной гранулометрии, позволяют получить более плотную упаковку частиц наполнителя в композиции, а значит, и сократить расход связующего [2]. В этой связи оптимизация составов полиэфиракрилатных композитов по гранулометрическому признаку наполнителя производилась нами по наименее возможной полимеремкости композита при сохранении высоких прочностных характеристик.

Оптимизационные исследования, как и при подборе состава отверждающей системы, выполнялись с помощью математических методов планирования эксперимента, только в этом случае был использован симплекс-решетчатый план Шеффе. За постоянные факторы, определяющие равные условия проведения опытов, были выбраны: содержание отвердителя ПЦОН-2 – 4 %, ускорителя ОК-1 – 2 % по массе олигоэфир-

акрилата МГФ-9 соответственно; композиции готовились равноподвижными. Вязкость полиминеральной композиции по вискозиметру типа ВП-4 составляла 20 см². Гранулометрический состав наполнителя для молотого кварцевого песка варьировался на трех уровнях: 0,63-0,315 мм – X_1 , 0,315-0,16 мм – X_2 , 0,16-0,071 мм – X_3 .

Интерес представляют данные, показывающие изменение свойств композитов при изменении крупности наполнителя в составе и переход от монодисперсных наполнителей к двух- и трехдисперсным. За контрольный был выбран состав с наполнителем крупностью 0,315-0,63 мм. Все показатели других составов рассчитывались в относительных значениях. Рассматривалась диаграмма «состав – свойство» с вершинами: Z_1 ($X_1 = 100\%$, $X_2 = 0\%$); Z_2 ($X_2 = 100\%$, $X_3 = 0\%$); Z_3 ($X_3 = 100\%$, $X_1 = 0\%$). Оптимизируемыми параметрами являлись прочность при сжатии, при растяжении, отношение полимер – наполнитель, плотность, пористость.

Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	Кодированные значения варьируемых факторов			Состав смеси кварцевых порошков, % по массе			Критерии оптимизации				
	X_1	X_2	X_3	0,630-0,315 мм	0,315-0,16 мм	0,16-0,071 мм	П/Н	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа	Средняя плотность ρ^0 , г/см ³	Пористость, %
1	1	0	0	100	0	0	1	1	1	1	1
2	0	1	0	0	100	0	1	1,07	1,23	1	1
3	0	0	1	0	0	100	1,3	1,42	1,60	1	0,91
4	0,333	0,667	0	33,3	66,7	0	0,97	0,97	1,18	0,96	1,17
5	0,333	0	0,667	33,3	0	66,7	1,09	1,44	1,54	1,03	0,84
6	0	0,333	0,667	0	33,3	66,7	1,17	1,47	1,58	1,02	0,97
7	0,667	0,333	0	66,7	33,3	0	0,86	0,98	1,06	1,03	0,95
8	0,667	0	0,333	66,7	0	33,3	0,97	1,25	1,35	1,08	0,73
9	0	0,667	0,333	0	66,7	33,3	0,93	1,32	1,33	1,01	0,98
10	0,333	0,333	0,333	33,3	33,3	33,3	1,05	1,25	1,44	0,97	1,06

Статистическая обработка результатов эксперимента позволила получить зависимости изменения относительных показателей прочности при сжатии (Y_1) и при изгибе (Y_2), средней плотности (Y_3), пористости (Y_4), отношения полимер – наполнитель (Y_5) полиэфиракрилатных композитов при изменении крупности и гранулометрического состава кварцевого наполнителя:

$$Y_1 = X_1 + 1,06X_2 + 1,42X_3 - 0,26X_1X_2 + 0,61X_1X_3 + 0,67X_2X_3 - 0,19X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,19X_2X_3(X_2 - X_3) - 0,32X_1X_3(X_1 - X_3) - 0,64X_1X_2X_3;$$

$$Y_2 = X_1 + 1,23X_2 + 1,6X_3 - 0,03X_1X_2 + 0,65X_1X_3 + 0,16X_2X_3 - 0,36X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,83X_2X_3(X_2 - X_3) + 1,93X_1X_2X_3;$$

$$Y_3 = X_1 + X_2 + X_3 - 0,03X_1X_2 + 0,27X_1X_3 + 0,09X_2X_3 + 0,46X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,1X_2X_3(X_2 - X_3) - 1,56X_1X_2X_3;$$

$$Y_4 = X_1 + X_2 + 0,91X_3 + 0,27X_1X_2 - 0,78X_1X_3 + 0,07X_2X_3 - 1,4X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,09X_2X_3(X_2 - X_3) + 3,85X_1X_2X_3;$$

$$Y_3 = X_1 + X_2 + 1,3X_3 - 0,37X_1X_2 - 0,54X_1X_3 - 0,37X_2X_3 - 0,61X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,82X_2X_3(X_2 - X_3) - 0,34X_1X_3(X_1 - X_3) + 2,63X_1X_2X_3.$$

Проверку адекватности моделей производили по критерию Стьюдента. По уравнениям регрессии были построены графики в изолиниях исследуемых показателей (рис. 2).

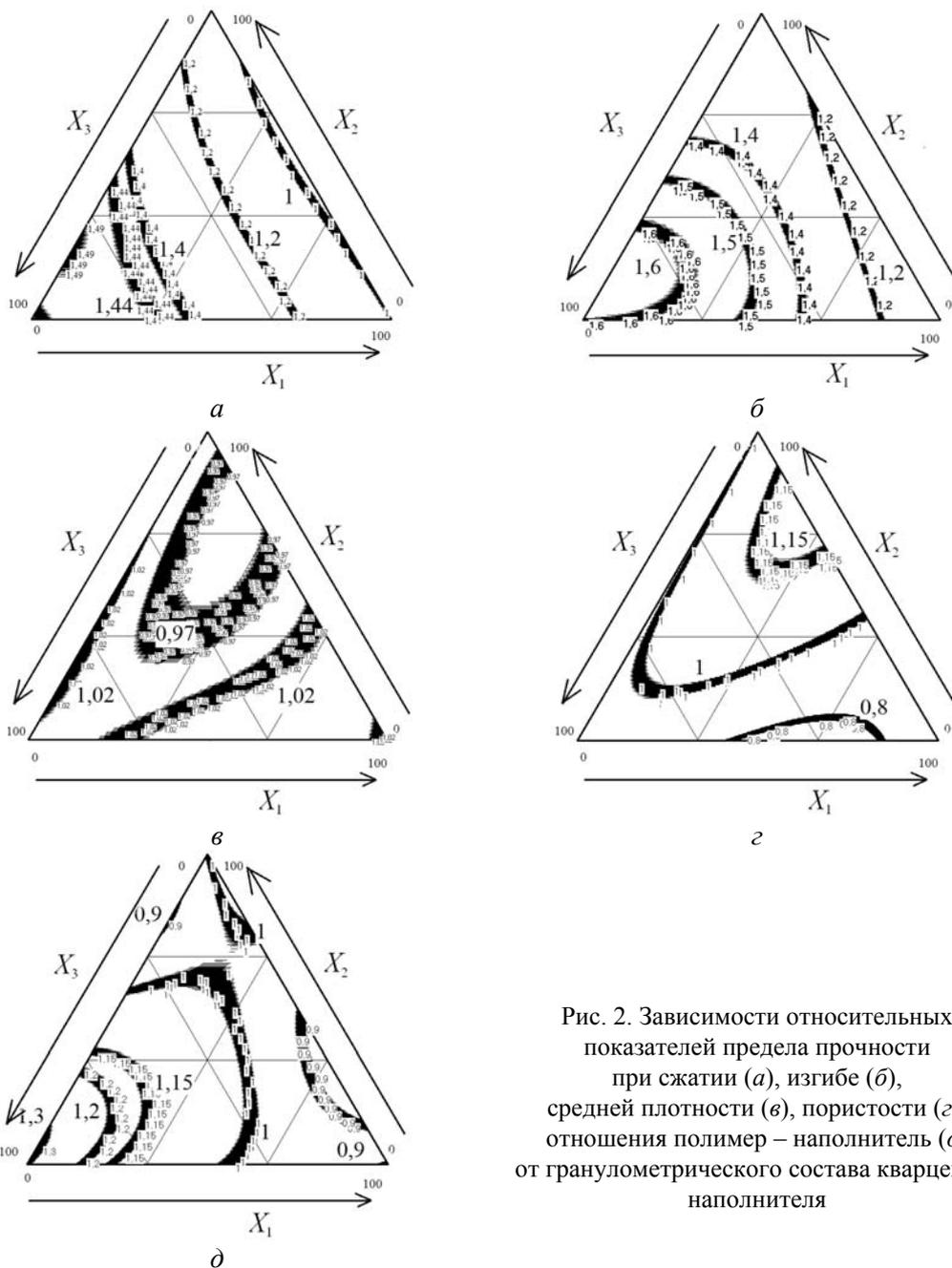


Рис. 2. Зависимости относительных показателей предела прочности при сжатии (а), изгибе (б), средней плотности (в), пористости (г), отношения полимер – наполнитель (д) от гранулометрического состава кварцевого наполнителя

Максимальная прочность при сжатии достигается при содержании 65 % фракции 0,16-0,072 мм и 35 % фракции 0,315-0,16 мм, максимальное же сопротивление растяжению при изгибе – при 100 % содержании мелкой фракции наполнителя, что соответствует максимальному отношению «полимер/наполнитель».

Таким образом, в результате проведенных исследований оптимизированы состав отверждающей системы для полиэфиракрилатного связующего марки МГФ-9, включающей олигоэфиракрилат, отвердитель ПЦОН-2 и ускоритель твердения ОК-1, и гранулометрический состав кварцевого наполнителя.

Список литературы

1. Берлин, А.А. Полиэфиракрилаты / А.А. Берлин, Т.Я. Кефели, В.Г. Королев. – М.: Наука, 1967. – 214 с.
2. Бобрышев, А.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем / А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев, В.Н. Козомазов. – СПб.: Наука, 2012. – 76 с.
3. Волгин, И.Д. Отверждение малеинатно-акрилатных смол различными иницирующими системами / И.Д. Волгин, В.Н. Денин, Е.Б. Петриленкова // Пластические массы. – 1968. – № 7. – С. 37–38.
4. Эпоксидные полимербетоны, модифицированные нефтяными битумами, каменноугольной и карбамидной смолами и аминопроизводными соединениями / под общ. ред. Ю.А. Соколовой и В.Т. Ерофеева. – М.: Палеотип, 2008. – 244 с.
5. Erofeev, V.T. Polimerbetone fur den Ban und die strasse / V.T. Erofeev, V.S. Bochkin // Die Strasse. – 6/89. – Berlin. – P.170–173.

References

1. Berlin, A.A. Polyesteracrilates / A.A. Berlin, T.J. Kefeli, V.G. Korolev. – M.: Science, 1967. – 214 p.
2. Bobryshev, A.N. Physics and synergetics of disperse-disordered condensed composite systems / A.N. Bobryshev, V.T. Erofeev, V.N. Kozomazov. – SPb.: Science, 2012. – 476 p.
3. Volgin, I.D. Hardening of arylate pitches by different initiating systems / I.D. Volgin, V.N. Denin, E.B. Petrilenkova // Plastic masses. – 1968. – № 7. – P. 37–38.
4. Epoxy polymer concrete, modified by oil bitumen, coal and corbamid pitches and aminproduction connections / gen. ed. of Yu.A. Sokolova, V.T. Erofeev. – M: Paleotip, 2008. – 244 p.
5. Erofeev, V.T. Polimerbetone fur den Ban und die strasse / V.T. Erofeev, V.S. Bochkin // Die Strasse. – 6/89. – Berlin. – P.170–173.

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

Фокин Георгий Александрович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail: fokingeorg@mail.ru

Гуськов Антон Сергеевич,
аспирант кафедры «Физика и химия»
E-mail: GuskovAnton90@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

Fokin Georgiy Alexandrovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Physics and Chemistry»
E-mail: fokingeorg@mail.ru

Guskov Anton Sergeevich,
Postgraduate of the department «Physics and
Chemistry»,
E-mail: GuskovAnton90@yandex.ru

УСКОРЕНИЕ РЕАКЦИИ ТВЕРДЕНИЯ ВЯЖУЩЕГО НИЗКОЧАСТОТНЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПОЛЕМ

Г.А. Фокин, А.С. Гуськов

Представлены результаты исследования ускорения реакции твердения вяжущего с помощью низкочастотного ультразвукового поля. Экспериментально подтверждено благотворное влияние электролита на повышение прочности цементного камня.

Ключевые слова: реакция твердения, вяжущее, ультразвуковое поле, электролит, цементный камень.

ACCELERATION OF BINDER HARDENING REACTION BY LOW-FREQUENCY ULTRASONIC FIELD

G.A. Fokin, A.S. Guskov

The results of researching acceleration of binder hardening reaction with the help of low-frequency ultrasound fields are given. Beneficial effect of electrolyte on cement strength increase is experimentally confirmed.

Keywords: curing reaction, binder, ultrasonic field, electrolyte, cement stone.

Для решения задач, связанных с повышением прочности и долговечности бетона, применяются различные методы. В последнее время активно набирают популярность ультразвуковые методы, которые используют как на стадии формирования структуры материала, так и при обработке воды затворения.

Целью проводимых исследований являлось получение вяжущего повышенной прочности с помощью воздействия на водный раствор цемента низкочастотным ультразвуковым полем, сопровождающегося явлением кавитации.

Как известно, схватывание и твердение бетона является, по существу, совокупностью химических и физико-химических процессов, порождаемых гелиевыми составляющими цемента. Поэтому становится ясным, что любое вещество, воздействующее на какую-либо часть этих сложных реакций, может в целом влиять на ход схватывания и твердения бетона [1]. Очень активными в этом отношении оказываются электролиты, которые могут либо повысить растворимость отдельных составляющих цементного клинкера, либо способствовать образованию большего количества частиц, т.е. влиять на коагуляцию.

Согласно классической теории электролитической диссоциации Аррениуса, электролиты в водных и некоторых неводных растворах существуют в виде независимых друг от друга частиц – ионов, образовавшихся при распаде молекул. Такие частицы присутствуют в растворах независимо от того, наложено или нет на раствор электри-

ческое напряжение. Аррениус ввел представление о частичной диссоциации электролитов в растворах.

Степень диссоциации α представляет собой отношение числа распавшихся на ионы молекул к общему числу молекул электролита в растворе до диссоциации. Величина α увеличивается при возрастании разведения раствора.

Второе положение теории состоит в том, что растворы электролитов подчиняются законам разбавленных растворов. Экспериментальное доказательство справедливости этих утверждений может быть получено, если определяемая различными способами степень диссоциации данного электролита окажется одной и той же.

К группе методов, позволяющих определить степень диссоциации, относятся такие, которые непосредственно используют наличие заряда у продуктов диссоциации, например измерение электропроводности [2].

Для получения данных по определению электропроводности в водном растворе было проведено исследование, которое состояло из трех последовательных измерений электропроводности в дистиллированной воде. Для этого использовалась дистиллированная вода, т.к. она полностью очищена от растворённых в ней минеральных солей, органических и других примесей в соответствии с ГОСТ 6709–72. Первоначально был произведен замер электропроводности в дистиллированной воде. Затем в эту воду был добавлен цемент. После этого воду с частицами цемента обработали низкочастотными ультразвуковыми колебаниями и измерили величину электропроводности. Полученные результаты представлены на рис. 1.

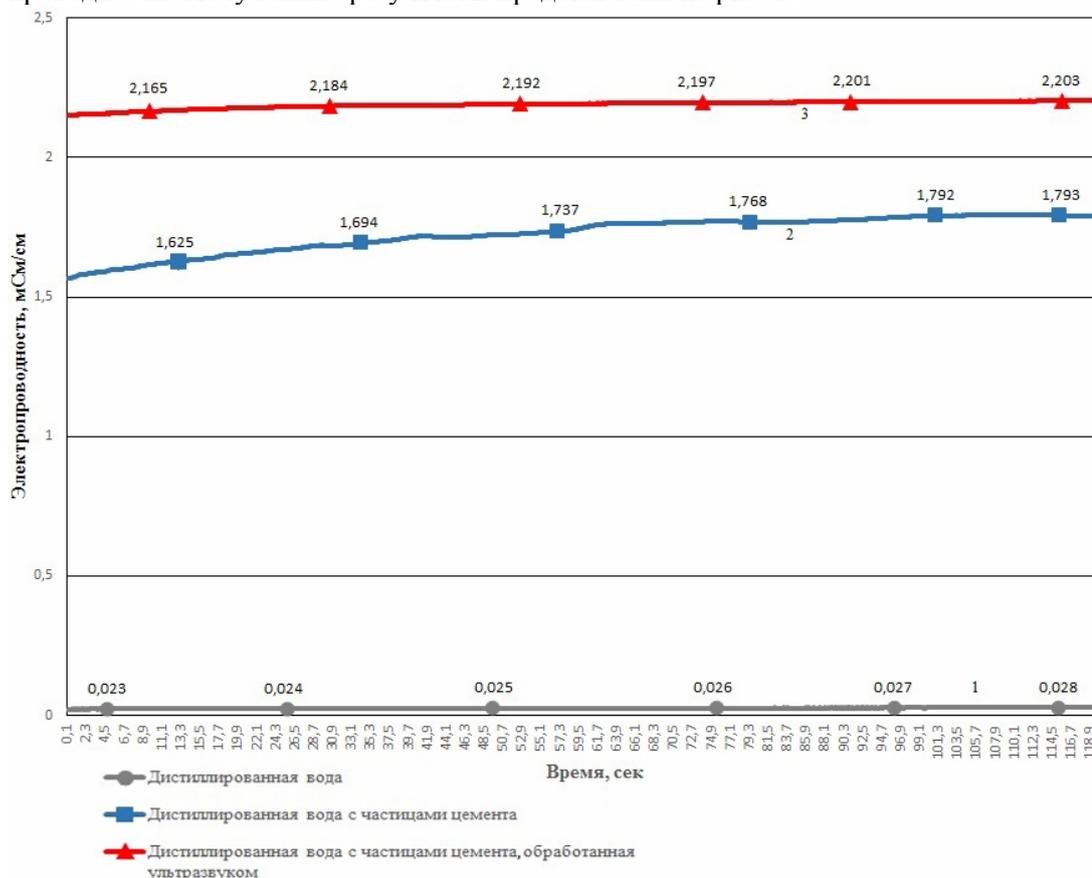


Рис.1. Экспериментальные данные по измерению электропроводности

Из рис.1 следует, что при введении цемента резко возрастает электропроводность (кривая 2), т.е. в растворе появились носители зарядов. При обработке ультразвуком наблюдается увеличение электропроводности (кривая 3), это, очевидно, происходит в результате разрушения флоккул цемента.

Для оценки влияния ультразвуковой кавитации был произведен следующий опыт. Емкость объемом 1 литр заполнялась дистиллированной водой, в нее был добавлен

портландцемент марки 500 (ГОСТ 10178–85) с последующей обработкой низкочастотными ультразвуковыми колебаниями в течение 5 минут. В полученный раствор опускались два электрода, сделанные из меди и цинка, на расстоянии 1 см друг от друга. Так как в цинке концентрация свободных электронов выше, чем в меди, цинковый электрод обозначается знаком минус, а медный – плюсом. Электроды подключены через осциллограф к компьютерному измерительному блоку L-micro. При погружении электродов в раствор возникает электрический ток, который фиксирует осциллографическая приставка и выдает осциллограмму на экран компьютера (рис.2, кривые 1 и 2 характеризуют изменение тока).

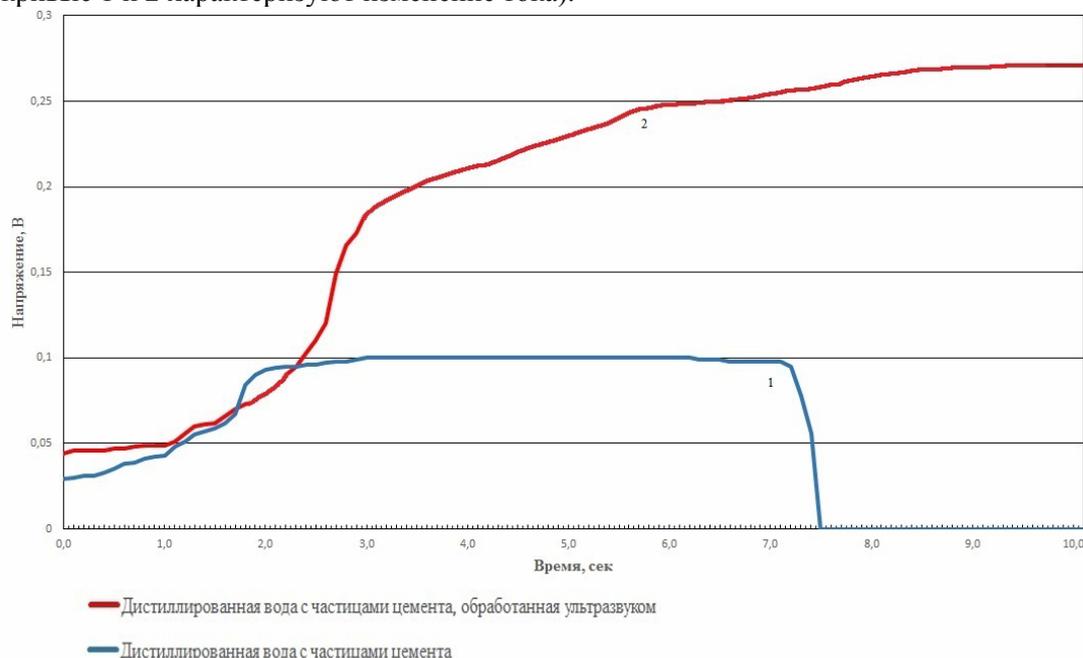


Рис.2. Изменение тока

Под действием низкочастотных ультразвуковых колебаний крупные частицы цемента распадаются на более мелкие [3], что приводит к увеличению частиц способных участвовать в переносе тока (кривая 2). Сравнивая кривые 1 и 2, мы видим, что напряжение сначала растет, а затем падает. Такое поведение объясняется тем, что ионам в растворе становится тесно, они начинают мешать друг другу. Противоположно заряженные ионы притягиваются друг к другу, а одноименно заряженные – отталкиваются. Вот поэтому ионы в растворе располагаются таким образом, чтобы как можно меньше мешать друг другу.

Влияние электролитов на скорость реакций в растворах проявляется в так называемых первичных солевых эффектах. Первичный солевой эффект сводится к изменению коэффициентов активности реагирующих частиц, в то время как вторичный эффект обусловлен фактическим изменением концентрации ионов в результате добавления в раствор электролита.

В разбавленных водных растворах коэффициент активности определяется формулой, которая при 25 °С имеет вид:

$$\lg k = \lg k^0 + 1,02z_a z_b \sqrt{J},$$

где J – ионная сила раствора; $z_a z_b$ – заряд иона; k^0 – константа скорости реакции.

Отсюда следует, что величина $\lg k$ линейно зависит от корня квадратного из ионной силы раствора. Очевидно, если заряды имеют одинаковые знаки, то увеличение ионной силы будет приводить к ускорению реакции, а при обратных знаках – к ее замедлению [2].

В бесконечно разбавленных водных растворах неэлектролитов коэффициент активности равен единице. По мере увеличения концентрации электролита величины

уменьшаются, проходят через минимум, а затем снова увеличиваются и становятся существенно большими единицы в крепких растворах. Наблюдаемая зависимость от концентрации определяется двумя физическими явлениями. Первое особенно сильно проявляется при малых концентрациях и обусловлено электростатическим притяжением между противоположно заряженными ионами. Силы притяжения между ионами преобладают над силами отталкивания, т.е. в растворе устанавливается ближний порядок, при котором каждый ион окружен ионами противоположного знака. Следствием этого является усиление связи с раствором, что находит отражение в уменьшении коэффициента активности. Естественно, что взаимодействие между ионами возрастает при увеличении их зарядов.

При возрастании концентрации все большее влияние на активность электролитов оказывает второе явление, которое обусловлено взаимодействием между ионами и молекулами воды (гидратацией). При этом в относительно концентрированных растворах количество воды становится недостаточным для всех ионов, и начинается постепенная дегидратация, т.е. связь ионов с раствором уменьшается, следовательно, увеличиваются коэффициенты активности.

На этой основе был разработан метод, позволяющий получать материалы повышенной прочности. В емкость с водопроводной водой (ГОСТ 2874–82 «Вода питьевая») добавляется портландцемент марки 500 (ГОСТ 10178–85) с последующей обработкой низкочастотными ультразвуковыми колебаниями в течение 5 минут. Далее на этом растворе замешивается цементное тесто. На рис.3 представлены графики температуры твердения цементного вяжущего, изготовленного по разработанному и обычному методам.

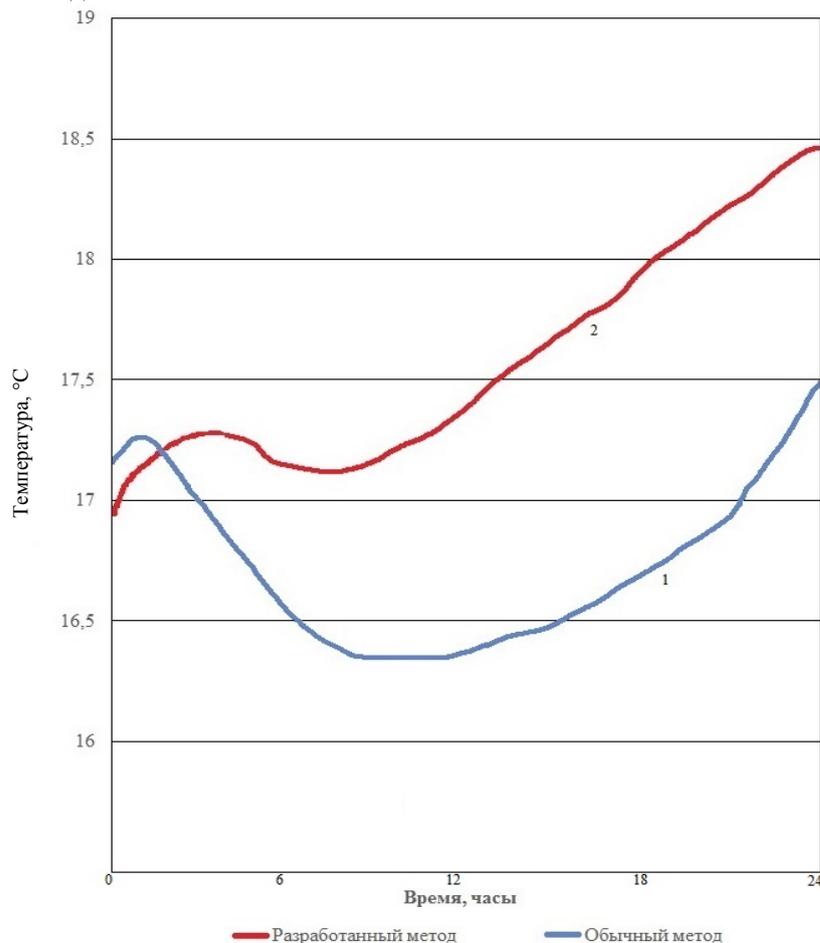


Рис.3. Температура твердения цементного вяжущего

Рис.3 наглядно показывает, что разработанная методика повышает температуру активного процесса твердения цементного вяжущего, ускоряя химические реакции

гидратации, и, таким образом, благотворно воздействует на рост прочности без каких-либо отрицательных последствий [4]. Для подтверждения этого из цементного вяжущего были изготовлены опытные образцы цементного камня. Результаты испытаний согласно ГОСТ 10180–2011 приведены в таблице.

Результаты испытаний опытных образцов

	№ серии	$R_{сж}$, кгс	$R_{сж}$, кгс/см ²	$R_{сж}$, МПа
Обычный метод	2	3500	218	21
	3	3500	218	21
	10	4560	285	27,94
	12	4000	250	24,51
Разработанный метод	14	5360	335	32,85
	16	5900	368,75	36,16
	17	5800	362,5	35,54
	18	6500	410	40

Из таблицы видно, что прочность цементного камня, изготовленного с использованием разработанного метода, по сравнению с обычным методом увеличилась в 2 раза. Обработка низкочастотным ультразвуковым полем обеспечивает повышение кавитационного эффекта, значительно усиливается эффект диспергации частиц цемента. Повышение прочности материала объясняется тем, что электролит положительно влияет на растворимость отдельных составляющих цементного клинкера. Следовательно, разработанная методика позволяет получать материалы повышенной прочности.

Список литературы

1. Невилль, А.М. Свойства бетона / А.М. Невилль. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 342 с.
2. Жуховицкий, А.А. Физическая химия: учеб. для вузов / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1987. – 688 с.
3. Фокин, Г.А., Влияние низкочастотных ультразвуковых колебаний малой мощности на дисперсные среды / Г.А. Фокин, О.В. Тетюшева, А.С. Гуськов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №16. – С. 57–61.
4. Лукьянченко, М.А., Особенности ультразвуковой кавитации в цементсодержащих системах / М.А. Лукьянченко, О.В. Прудко // Актуальные проблемы архитектуры, строительства и энергосбережения: сб. науч. тр. – Симферополь: НАПКС, 2012. – Вып. 4. – С. 349–358.

References

1. Neville, A.M. Properties of concrete / A.M. Neville. – Moscow: Publishing House construction, 1972. – 342 p.
2. Zhukhovitskii, A.A. Physical chemistry: studies. for high schools / A.A. Zhukhovitskii, L.A. Schwartzman. – 4th ed., Rev. and add. – Moscow, Metallurgy, 1987. – 688 p.
3. Fokin, G.A., Influence of low-frequency ultrasonic fluctuations of low power on disperse environments / G.A. Fokin, O.V. Tetyusheva, A.S. Guskov // Regional architecture and engineering. – 2013. – № 16. – P. 57–61.
4. Lukianchenko, M.A., features ultrasonic cavitation in cementitious systems / M.A. Lukianchenko, O.V. Prudkiy // Actual problems of architecture, construction, and energy conservation: Wed. Scientific. Work. – Simferopol: NAPCS, 2012. – Vol. 4. – P. 349–358.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.072.221

ООО «НТО строителей Мордовии»

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Пролетарская, д. 39

Селяев Владимир Павлович,
президент Научно-технического общества
строителей Республики Мордовия,
академик РААСН, доктор технических
наук, профессор, зав. кафедрой
«Строительные конструкции»
E-mail: ntorm80@mail.ru

*Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева*

Россия, 430000, г. Саранск,
ул. Советская, д. 24
тел.: (8342) 47-71-56

Соловьев Алексей Александрович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: alekseyy_solovyov@ro.ru

Парамонов Роман Николаевич,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: parroman@mail.ru

Алимов Марат Фатихович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: marat_alimov.91@mail.ru

Шабаяев Ильшат Наильевич,
магистрант архитектурно-строительного
факультета
E-mail: ilshatshabaev@yandex.ru

*Ltd. «Scientific and Technical Society of the
Mordovia Republic»*

Russia, 430005, Saransk, 39,
Proletarskaya St.

Seljaev Vladimir Pavlovich,
President of Scientific and Technical Society
of the Mordovia Republic, Academician of the
Russian Academy of Architectural and Construction
Sciences, Doctor of Sciences, Professor, Head of
the department «Building designs»
E-mail: ntorm80@mail.ru

*Mordovian State University
named after N.P. Ogarev*

Russia, 430000, Saransk, 24,
Soviet St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Solovyev Aleksey Aleksandrovich,
Postgraduate of the department «Building
designs»
E-mail: alekseyy_solovyov@ro.ru

Paramonov Roman Nikolayevich,
Postgraduate of the department «Building
designs»
E-mail: parroman@mail.ru

Alimov Marat Fatikhovich,
Postgraduate of the department «Building
designs»
E-mail: marat_alimov.91@mail.ru

Shabayev Ilshat Nailievich,
Undergraduate architecture and construction
engineering
E-mail: ilshatshabaev@yandex.ru

РАБОТА БАЛОК, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ

В.П. Селяев, А.А. Соловьев, Р.Н. Парамонов, М.Ф. Алимов, И.Н. Шабаяев

Приведены результаты экспериментальных исследований прочности бетонных балок, армированных композитной стеклопластиковой арматурой.

Ключевые слова: армобетонные конструкции, композитная стеклопластиковая арматура, экспериментальные исследования.

WORK OF CONCRETE BEAMS REINFORCED BY FIBERGLASS REINFORCEMENT

V.P. Selyaev, A.A. Solovyev, R.N. Paramonov, M.F. Alimov, I.N. Shabaev

The results of the experimental research of concrete beams strength reinforced by composite fiberglass reinforcement are described in the article.

Keywords: reinforced concrete structures, composite fiberglass reinforcement, experimental studies.

Многочисленные публикации в мировой научной литературе о применении композитной арматуры подтверждают перспективность этого материала. За последние годы в России заметно увеличился объем производства композитной арматуры, которая применяется в основном в качестве гибких связей в многослойных конструкциях.

Физико-механические свойства композитной арматуры позволяют использовать ее в армобетонных конструкциях в виде отдельных стержней, плоских сеток, объёмных каркасов. Однако ее применение сдерживается, так как недостаточно экспериментальных данных об особенностях совместной работы цементного бетона и композитной арматуры в условиях действия длительных нагрузок различного вида, переменных значений влажности, температуры, рН поровой среды.

Экспериментально исследованы особенности работы композитной арматуры в изгибаемых элементах строительных конструкций; изучены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния бетона и композитной арматуры в процессе нагружения, характер деформирования и возможные формы разрушения элементов, армированных композитной стеклопластиковой арматурой, получены данные о прочности, жесткости и трещиностойкости для последующего анализа.

В качестве экспериментальных образцов были изготовлены армобетонные балки прямоугольного сечения размерами 140×120×1030 мм из бетона класса В20 по ГОСТ 7473–94 [1], армированные стеклопластиковыми арматурными стержнями производства компании «Армастек» Ø 6 (ТУ 2296-001-60722703–2010) [2]. Композитная стеклопластиковая арматура представляет собой стержни периодического профиля, изготавливаемые методом пултрузии из непрерывного армирующего волокна, в качестве которого применяется стеклянный ровинг, и термореактивного связующего на основе синтетических смол. Для увеличения сцепления с бетоном на основной стержень навит пучок волокна меньшего диаметра.

Испытания бетонных балок, армированных стержнями композитной стеклопластиковой арматуры, производились в соответствии с ГОСТ 8829–94 [3].

По экспериментальным данным определено нормативное сопротивление композитной арматуры при растяжении, которое соответствует условному пределу текучести композитной арматуры, заданному с 95 % вероятностью.

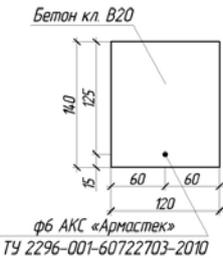
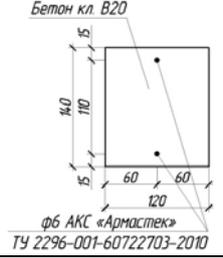
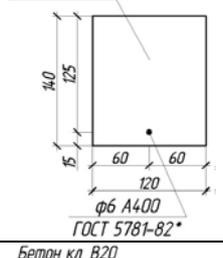
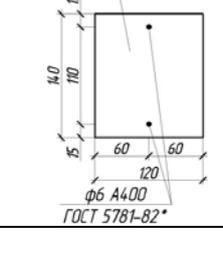
Экспериментально исследовались особенности деформирования и разрушения армобетонных балок путем испытания 2 серий образцов, включавших 2 балки, армированные композитной стеклопластиковой арматурой, и 1 балку, армированную стальными стержнями Ø6 А400 ГОСТ 5781–82* [4]. Диаметр композитной и стальной арматуры, ее расположение принимались одинаковыми. Схема армирования показана в таблице.

В таблице принят следующий принцип обозначений: “С” – балки, армированные композитной арматурой; “М” – металлической. В серии С-1 и М-1 испытывались балки с одиночным армированием стержнями диаметром 6 мм в растянутой зоне бетона. Серии С-3 и М-3 представлены балками с двойным армированием стержнями диаметром 6 мм в растянутой и сжатой зонах. Величина защитного слоя бетона – 15 мм, установка арматурных стержней в проектное положение выполнялась при помощи пластмассовых фиксаторов.

Общий вид установки для испытаний приведен на рис. 1. Она состоит из испытываемого образца 1, установленного на подставки. Сосредоточенная нагрузка, созда-

ваемая с помощью домкрата, передается на балку через металлическую траверсу 2. Под действием нагрузки испытываемая балка упирается в шарнирные опоры 3. Нагружение образцов – ступенчатое – по 5...10 % от предполагаемой разрушающей нагрузки. Контроль величины нагрузки осуществлялся при помощи переносного динамометра 4 ДОСМ-3-50У 5098. Прогиб измерялся тремя прогибомерами часового типа с ценой деления 0,1 мм (5). Ширина раскрытия трещин измерялась оптическим микроскопом МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм. На каждой ступени нагрузка выдерживалась 10 минут, во время которых снимались показания приборов, фиксировались трещины, их развитие по высоте и измерялась ширина раскрытия трещин на уровне продольной композитной арматуры.

Результаты испытаний бетонных балок, армированных композитной стеклопластиковой арматурой

Номер балки	Эскиз поперечного сечения	Разрушающие усилия				Момент трещинообразования		Ширина раскрытия трещин	Прогибы	
		M_{ult} кН·м	$M_{ult}^{теор}$ кН·м	Q_{ult} кН	$Q_{ult}^{теор}$ кН	$M_{cr,ult}$ кН·м	$M_{cr,ult}^{теор}$ кН·м	a_{cr} мм	f_{ser} мм	f_{ult} мм
С-1		1,355	1,174	4,516	10,124	0,541	0,553	1,10	2,74	10,79
		1,511		5,038		0,812		1,50	3,21	16,77
С-3		1,355	1,174	4,516	10,124	0,572	0,555	1,70	2,12	14,05
М-1		1,355	1,215	4,516	10,124	1,000	0,569	0,8	0,53	2,41
М-3		1,418	1,215	4,725	10,124	-	0,577	-	-	2,24

Нормативное значение сопротивления растяжению стеклопластиковой арматуры определено согласно проекту СП «Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования» [5]:

$$R_{f,n} = R_{f,исп}^{cp} (1 - 1,64v) = 1159,018 \cdot (1 - 1,64 \cdot 0,141) = 891,007 \text{ МПа} , \quad (1)$$

где $R_{f,исп}^{cp}$ – среднее значение сопротивления растяжению стеклопластиковой арматуры по результатам испытания образцов, $R_{f,исп}^{cp} = 1159,018 \text{ МПа}$; S – стандартное отклонение значений среднего значения сопротивления растяжению стеклопластиковой арматуры по результатам испытания образцов, $S = 163,213 \text{ МПа}$; v – коэффициент вариации значений среднего значения сопротивления растяжению стеклопластиковой арматуры по результатам испытания образцов, $v = S / R_{f,исп}^{cp} = 163,213 / 1159,018 = 0,141$.

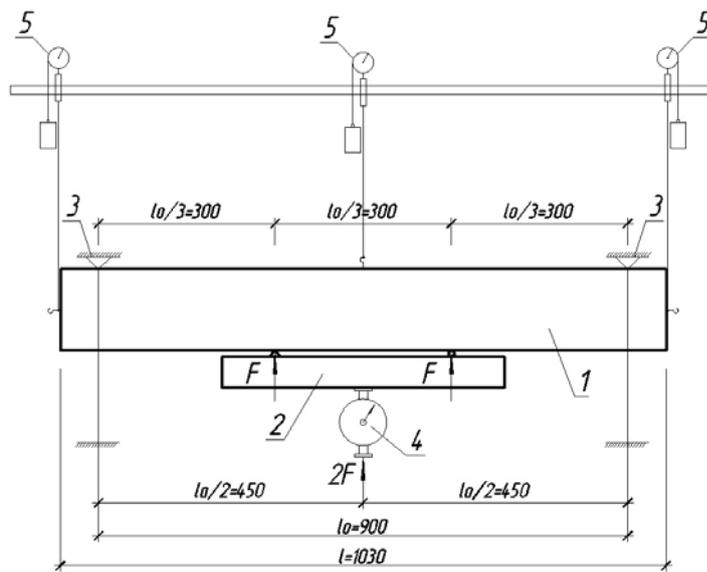


Рис. 1. Схема нагружения опытных балок и расстановки измерительной аппаратуры

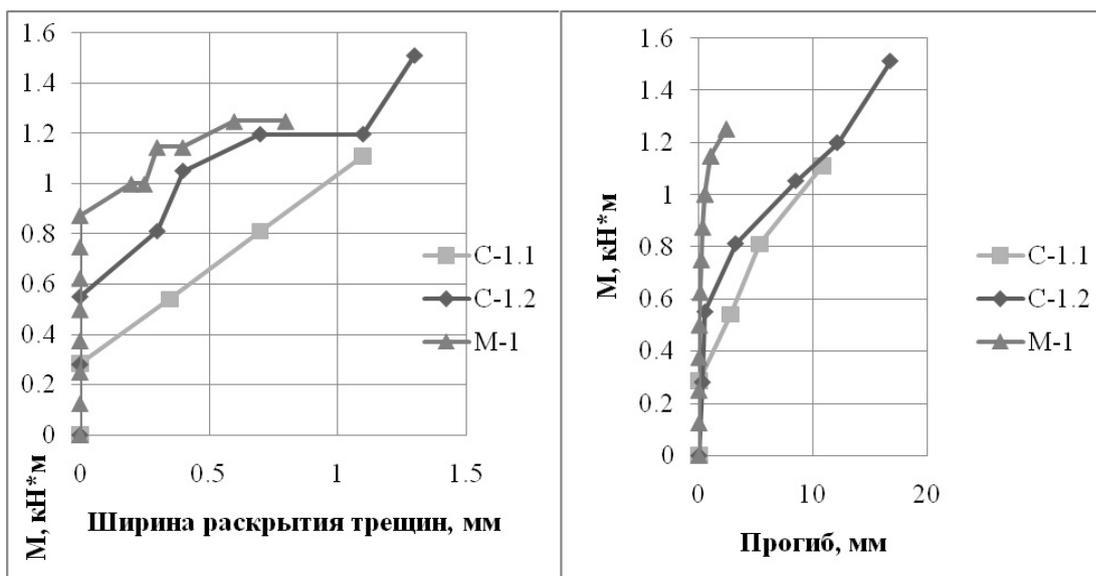


Рис. 2. Измерение прогибов и ширины раскрытия трещин с ростом нагрузки (балки C-1 и M-1)

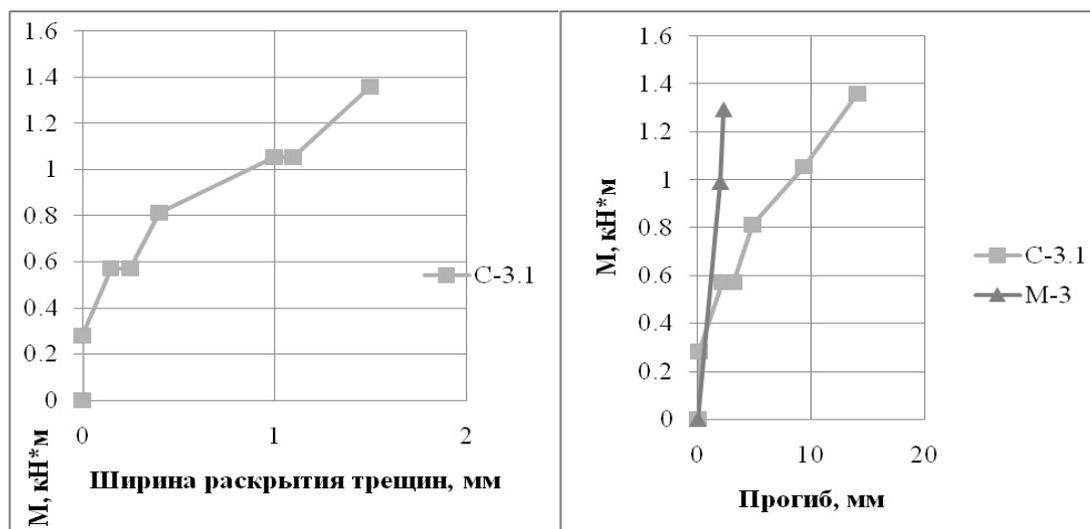


Рис. 3. Измерение прогибов и ширины раскрытия трещин с ростом нагрузки (балки С-3 и М-3)

Расчетное значение сопротивления растяжению стеклопластиковой арматуры при нагружении конструкции кратковременной нагрузкой согласно [5] составляет:

$$R_f = \gamma_{f1} \gamma_{f2} R_{f,n} / \gamma_f = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 891,007 / 1,5 = 475,204 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где γ_f – коэффициент надежности по материалу, принимаемый при расчете по предельным состояниям второй группы равным 1,0, а при расчете по предельным состояниям первой группы – равным 1,5; $\gamma_{f1} = 0,8$ – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации конструкции с неметаллической композитной арматуры, принимаемый по табл. 5.2 [5]; $\gamma_{f2} = 1,0$ – коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки (для кратковременной нагрузки), принимаемый по табл. 5.3 [5].

Таким образом, теоретическая несущая способность испытанных балок серий С-1 и С-3 составляет

$$x = \frac{R_f A_f}{R_b b} = \frac{475,204 \cdot 10^3 \cdot 20,41 \cdot 10^{-6}}{10,35 \cdot 10^3 \cdot 0,12} = 7,809 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M_{ult}^{теор} &= R_f A_f (h_0 - 0,5x) = \\ &= 475,204 \cdot 10^3 \cdot 20,41 \cdot 10^{-6} \cdot (0,125 - 0,5 \cdot 7,809 \cdot 10^{-3}) = 1,174 \text{ кН} \cdot \text{м}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $A_f = 20,41 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения композитной арматуры $\varnothing 6 \text{ мм}$.

Для определения фактического расчетного значения сопротивления растяжению стеклопластиковой арматуры в армобетонных конструкциях с одиночным армированием произведем обратный расчет, подставив в формулы (3)-(4) полученные при испытаниях значения изгибающих моментов.

Наименьший изгибающий момент, действующий во время разрушения балок серий С-1 и С-3, составляет $M_{ult} = 1,355 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

$$M_{ult} = R_f^p A_f (h_0 - 0,5x), \quad (5)$$

где R_f^p – расчетное фактическое значение предела прочности композитной арматуры, МПа; $R_b = R_b^н \gamma = 11,50 \cdot 0,9 = 10,35 \text{ МПа}$ – расчетное значение предела прочности бетона на сжатие при расчете по 1-й группе предельных состояний (для бетона класса В20).

Подставляем формулу (3) в формулу (4), получаем:

$$\begin{aligned}
 M_{ult} &= R_f^p A_f (h_0 - 0,5x) = R_f A_f (h_0 - 0,5 \frac{R_f^p A_f}{R_b b}) = \\
 &= R_f^p \cdot 20,41 \cdot 10^{-6} (0,125 - 0,5 \cdot \frac{R_f^p \cdot 20,41 \cdot 10^{-6}}{10,35 \cdot 10^3 \cdot 0,12}) = \\
 &= R_f^p \cdot 20,41 \cdot 10^{-6} (0,125 - R_f^p \cdot 8,217 \cdot 10^{-9}) = \\
 &= R_f^p \cdot 2,551 \cdot 10^{-6} - (R_f^p)^2 \cdot 1,677 \cdot 10^{-13}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Решая квадратное уравнение вида

$$-1,677 \cdot 10^{-13} \cdot (R_f^p)^2 + 2,551 \cdot 10^{-6} \cdot R_f^p - 1,355 = 0, \tag{7}$$

получаем $R_f^p = 542,630$ МПа, что на 14,2 % больше теоретического значения, подсчитанного по методике [5].

Выводы

1. Закономерности сопротивления бетонных элементов, армированных композитной стеклопластиковой арматурой, а именно характер трещинообразования, деформирования и разрушения, соответствуют аналогичным закономерностям для элементов, армированных стальной арматурой.

2. В бетонных балках, армированных стеклопластиковой арматурой, возможно два основных вида разрушения:

- разрыв продольной растянутой арматуры;
- раздробление бетона сжатой зоны.

При низких коэффициентах армирования растянутой зоны бетона (балки серии С-1 и С-3) разрушение происходит в результате разрыва арматуры.

3. Прогобы балок, армированных композитной стеклопластиковой арматурой, при нагрузке, соответствующей уровню нормативной, составляли 10,95...20,15 мм, что соответствует (1/44,7...1/82,2) пролета. Это не противоречит требованиям действующих СП к предельным прогибам элементов со стальной арматурой и объясняется малым модулем упругости стеклопластиковой арматуры.

4. Ширина раскрытия трещин опытных балок при нагрузке, соответствующей уровню нормативной, изменялась в зависимости от коэффициента продольного армирования растянутой зоны и для балок С-1 и С-3 серий составляла 1,10...1,70 мм. Таким образом, зафиксированная ширина раскрытия трещин превышает предельные значения, установленные для стальной арматуры (0,30...0,40 мм).

Для бетонных конструкций с неметаллической арматурой проведение расчётов по определению ширины раскрытия трещин – ($a_{cr,c}$) из условий сохранности арматуры не требуется, поскольку для них не установлено предельно допустимых величин ширины раскрытия трещин – ($a_{cr,ult}$).

5. Композитная арматура может применяться для армирования бетонных конструкций при соответствующем технико-экономическом обосновании, но ввиду установленных отличий в прочностных и деформативных характеристиках, несущей способности, трещиностойкости и деформативности, для применения композитной стеклопластиковой арматуры при проектировании необходима разработка специального нормативного документа на основании результатов проведенных экспериментальных исследований.

Список литературы

1. ГОСТ 7473–94. Смеси бетонные. Технические условия.
2. ТУ 2296-001-60722703–2010. Арматура композитная «Армастек». Технические условия.
3. ГОСТ 8829–94. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости.
4. ГОСТ 5781–82*. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.
5. Первая редакция Проекта СП «Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования».

References

1. GOST 7473–94. Ready-mixed concrete. Specifications.
2. TU 2296-001-60722703–2010. Composite reinforcement «Armastek». Specifications.
3. GOST 8829–94. Reinforced concrete and prefabricated concrete building products. Loading test methods. Assessment of strength, rigidity and crack resistance.
4. GOST 5781–82*. Hot-rolled steel for reinforcement of ferroconcrete structures. Specifications.
5. The first edition of the project SP «Construction of concrete with composite non-metallic reinforcement. Rules for design».

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

Скачков Юрий Петрович,
доктор технических наук, профессор,
советник РААСН, ректор, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Математика и математическое
моделирование»

Кочеткова Майя Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством и
технология строительного производства»

Корнюхин Анатолий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Геотехника и дорожное
строительство»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Skachkov Yuri Petrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Pussian Academy of Architectural and
Building Science, rector, Professor of the
department «Building designs»

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Mathematics and
mathematical modeling»

Kochetkova Maya Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Quality management and
technology of building production»

Kornuhin Anatoly Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Geotechnics and road
construction»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМ РАЗРУШЕНИЯ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ КОРОТКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин

По результатам экспериментальных исследований определены схемы разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок при изменении пролета среза и схем армирования.

Ключевые слова: короткие железобетонные балки, прочность, трещиностойкость, схемы разрушения и трещинообразования.

DETERMINATION OF DESTRUCTION AND CRACKING FORMATION SCHEMES OF SHORT REINFORCED CONCRETE BEAMS ACCORDING TO EXPERIMENTAL DATA

Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornuhin

According to experimental data they have determined destruction and cracking formation schemes of short reinforced beams at spanshear and reinforcement schemes change.

Keywords: short-concrete girders, strength, fracture toughness, fracture and cracking scheme.

Целью работы является совершенствование методов расчета прочности коротких балок, а также разработка методов расчета трещиностойкости и определения ширины раскрытия трещин в железобетонных балках при изменении пролета среза a/h_0 от 0,25 до 1,5.

Программой исследований предусматривалось:

- определение прочности балок;
- определение трещиностойкости балок;
- определение ширины раскрытия трещин балок;

- определение влияния горизонтальных и вертикальных хомутов на прочность, трещиностойкость и ширину раскрытия трещин в балках с пролетом среза a/h_0 от 1 до 1,5;
- определение влияния пролета среза на характер образования трещин, вид разрушения в балках без поперечной арматуры и в балках, армированных равномерно распределенной арматурой.

Испытывались образцы коротких балок прямоугольного сечения с размерами 25×40 см. Длина образцов изменялась в соответствии с пролетом среза. Всего было изготовлено 10 образцов. Шесть образцов имели только продольную растянутую арматуру. Исследуемым фактором принимался пролет среза. Два образца армировались горизонтальными, два – вертикальными хомутами. В этом случае исследуемым фактором являлся вид распределенного армирования при изменении a/h_0 от 1 до 1,5. Все образцы коротких балок имели одинаковое количество растянутой продольной арматуры [1, 2]. Характеристика опытных образцов приведена в табл.1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики опытных образцов коротких балок

№ п/п	Серии	Марка образца	Геометрические размеры				Продольное армирование A_s		Горизонтальные хомуты $A_{sw,g}$			Вертикальные хомуты $A_{sw,v}$			
			b , см	h , см	L , см	h_0 , см	кол-во, шт.	диаметр, класс	кол-во, шт.	диаметр, класс	шаг, см	кол-во, шт.	диаметр, класс	шаг, см	
1	I	Б-1	25	40	47	36	3	18А-III	-	-	-	-	-	-	-
2		Б-2	25	40	65	36	3	18А-III	-	-	-	-	-	-	-
3		Б-3	25	40	83	36	3	18А-III	-	-	-	-	-	-	-
4		Б-4	25	40	101	36	3	18А-III	-	-	-	-	-	-	-
5		Б-5	25	40	119	36	3	18А-III	-	-	-	-	-	-	-
6		Б-6	25	43	137	36	3	18А-III	-	-	-	-	-	-	-
7	II	Б-7	25	43	101	36	3	18А-III	3	8А-III	5	-	-	-	-
8		Б-8	25	43	137	36	3	18А-III	3	8А-III	5	-	-	-	-
9		Б-9	25	43	101	36	3	18А-III	-	-	-	3	8А-III	10	-
10		Б-10	25	43	137	36	3	18А-III	-	-	-	3	8А-III	10	-

Для улучшения визуального наблюдения за образованием трещин подготовка к испытаниям производилась в следующем порядке. Выполнялась зачистка и побелка поверхности бетона образцов. Для измерения деформаций бетона на боковую грань образца наклеивались тензодатчики с базой 50 мм.

Схема и общий вид установки для испытаний показаны на рис. 1. Нагружение балок производилось гидравлическим домкратом ДГ-200 через систему распределительных траверс поэтапно: по 2000 кг до образования исследуемых трещин и далее, до разрушения, по 5000 кг. Схема нагружения показана на рис.1. Определение ширины раскрытия трещин в бетоне производилась с использованием трубки Брюнелля.

По результатам испытаний произведена классификация трещин, определены разрушающие усилия, а также усилия при образовании и развитии трещин при изменении основных факторов. При разработке схем разрушения и трещинообразования использовались основные принципы проектирования сложных технических систем [3, 4, 5]. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

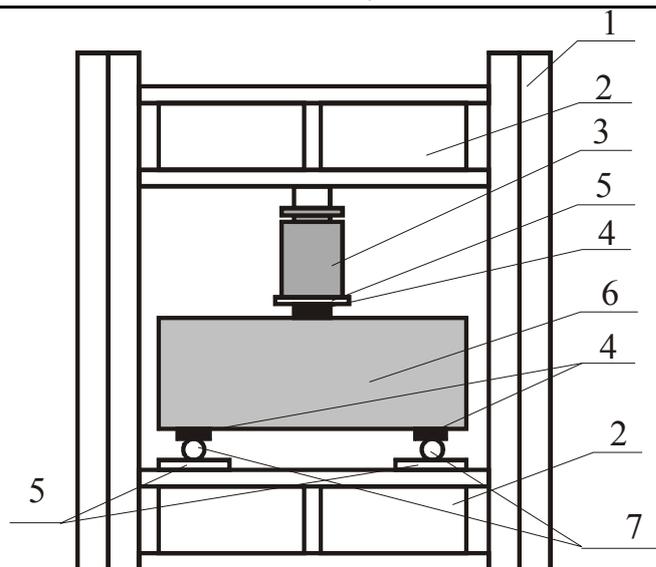


Рис. 1. Схема силовой установки испытания образцов-балок:

1 – металлическая рама; 2 – распределительная траверса; 3 – гидродомкрат;
4 – опорные площадки; 5 – жесткий штамп; 6 – испытываемый образец; 7 – катки

Схемы разрушения и трещинообразования

Опытные образцы балок серии 1 с пролетом среза от 0,25 до 1,5 Б-1...Б-6 разрушились по сжатой зоне (рис. 2). Опытные балки Б-1, Б-2 с пролетом среза 0,25...0,5 разрушились по наклонной трещине, проходящей внутри сжатого подкоса. Примечательно, что траектории этих трещин приближаются к диагонали наклонной полосы бетона, расположенной между грузовой и опорной площадками. При этом трещина имеет быстрый характер образования, определяющий момент разрушения. Важно отметить, что диагональная трещина пересекает серию прерывистых наклонных трещин, характерных при раздавливании бетона.

Момент разрушения в балке Б-1 сопровождался выделением сжатой наклонной полосы наклонной трещины с внешней стороны у грузовой площадки, в балке Б-2 – образованием серии наклонных прерывистых трещин, расположенных у опорной и грузовой площадок и характеризующих раздавливание бетона.

Разрушение балок Б-3...Б-6 с пролетом среза 0,75...1,5 происходит по наклонным трещинам, расположенным в сжатом подкосе (вблизи внутренней границы этого подкоса). Характерно, что изначально наклонные трещины образуются в нижней части балки у внутренней части опорной площадки, и в момент ее образования длина составляет 0,8 от высоты. Усилие образования этой трещины составляет 0,6–0,5 от разрушающей. С увеличением пролета среза увеличивается количество трещин, образующихся в бетоне растянутой зоны. В момент разрушения в балках Б-3, Б-4 происходит слияние граничной трещины с трещиной, траектория которой приближается к диагонали условной сжатой полосы. Таким образом, граничные наклонные трещины, выделяющие сжатый подкос с внутренней стороны, переходят в диагональную трещину.

В балках Б-5, Б-6 с пролетом среза 1,25–1,5 разрушение сжатой полосы сопровождалось местным разрушением бетона под грузовой и опорными площадками, имеющим клинообразный характер. В момент разрушения зоны сжатия объединялись одной либо двумя близко расположенными наклонными трещинами. Длина этих трещин составляла примерно 0,7 от высоты балки, траектория трещины смещалась к внутренней грани сжатой полосы, то есть в сторону максимальных сжимающих напряжений.

В балке Б-7 (рис. 3) разрушение сжатой полосы характеризуется наличием прерывистых наклонных трещин, концентрирующихся у внутренней грани наклонной сжатой полосы, то есть в зоне максимальных напряжений внутри сжатой бетонной

полосы. Балка Б–8 с вертикальными хомутами и пролетом среза 1,5 разрушалась по сжатой бетонной полосе при активном развитии наклонной трещины с диагональной траекторией внутри сжатого подкоса. При этом в балках Б–7 и Б–8 разрушающая сила увеличилась в 1,65–1,6 раза по сравнению с балками без распределенного армирования.

В балке Б–9 (рис. 4) с пролетом среза $a/h_0=1$ разрушение происходило почти одновременно по сжатой и растянутой зонам. Основной характеристикой вида разрушений является активное развитие наклонных и вертикальных трещин и увеличение их количества. Разрушающее усилие возросло в 1,4 раза. Разрушение балки Б–10 произошло по растянутой зоне с активным раскрытием вертикальных трещин, выделяющих сжатую зону бетона. Разрушающее усилие увеличилось в 1,5 раза по сравнению с балками без распределенного армирования [6].

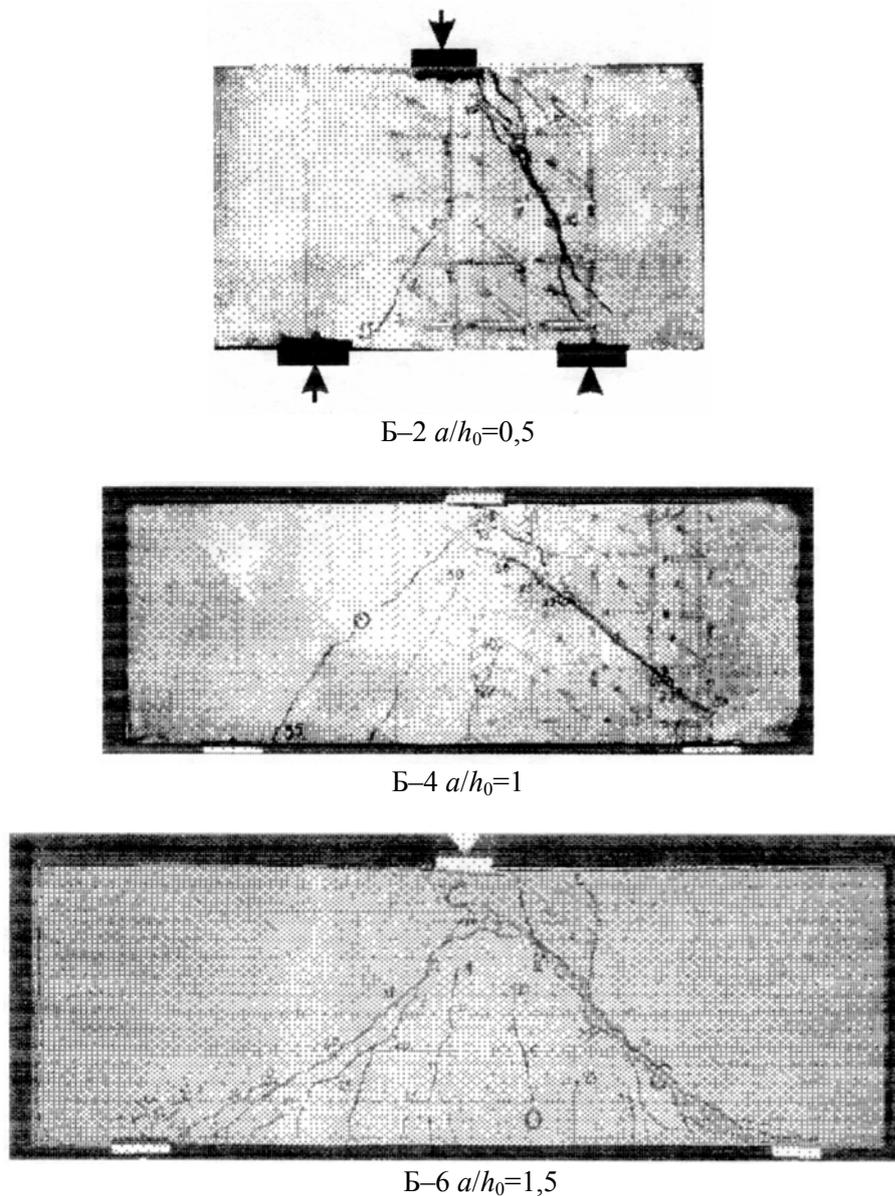


Рис. 2. Фотографии опытных образцов коротких балок серии 1

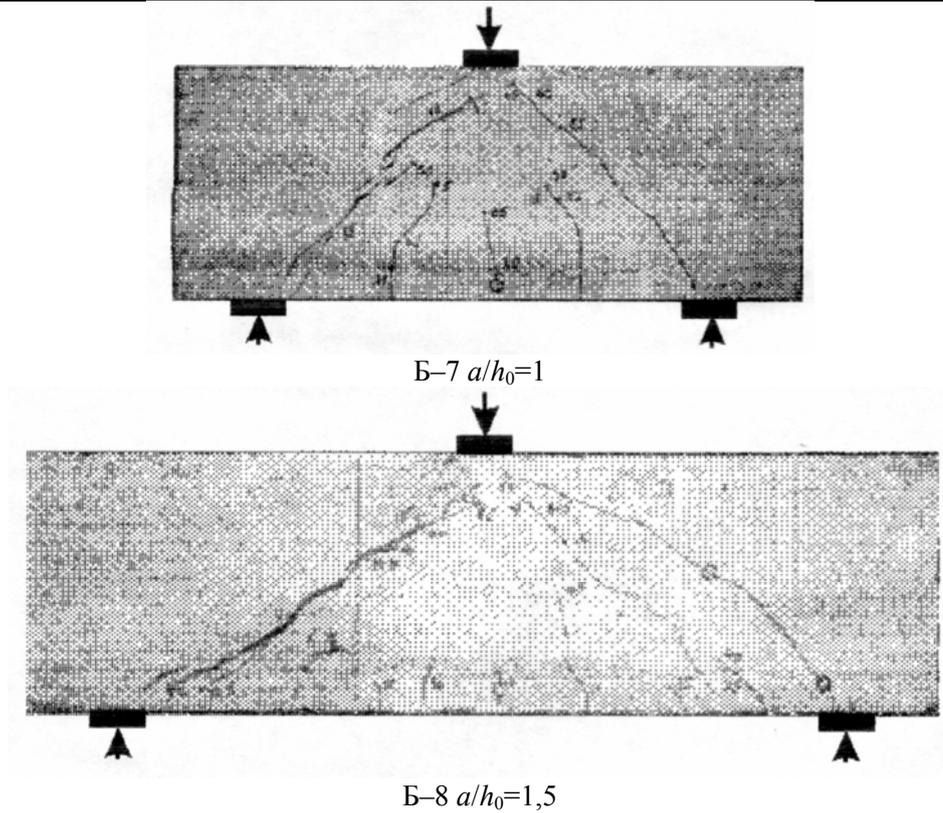


Рис. 3. Фотографии опытных образцов коротких балок серии 2

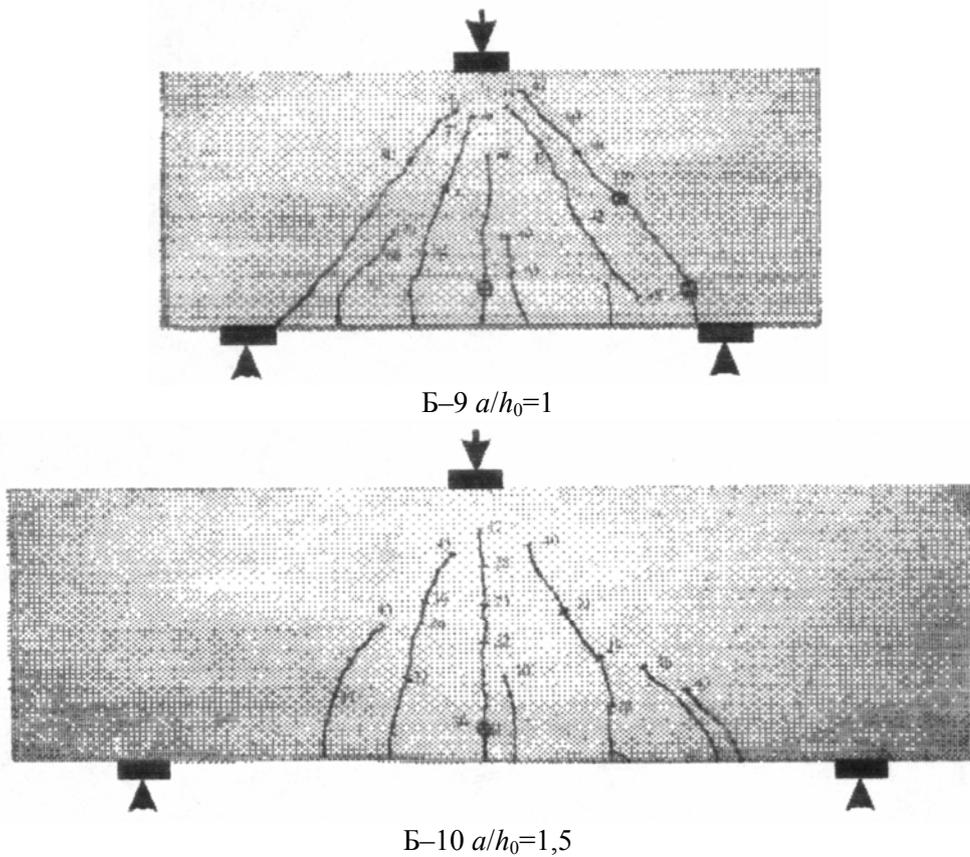


Рис. 4. Фотографии опытных образцов коротких балок серии 3

Выявились четыре типа трещин. К *первому* типу отнесены вертикальные трещины Т-Р, расположенные в растянутой зоне балки. Ко *второму* типу отнесены наклонные трещины, названные граничными (Т-Г). Характер расположения их меняется. Они могут выделять сжатую зону бетона как с внутренней, так и с внешней стороны, либо только с одной из сторон. К *третьему* типу отнесена серия параллельных прерывистых наклонных трещин, расположенных в сжатой зоне бетона (Σ Т-О), и, наконец, к *четвертому* типу отнесены магистральные наклонные трещины, расположенные внутри сжатой наклонной полосы (Т-О) [7, 8]. Схема расположения трещин показана на рис. 5.

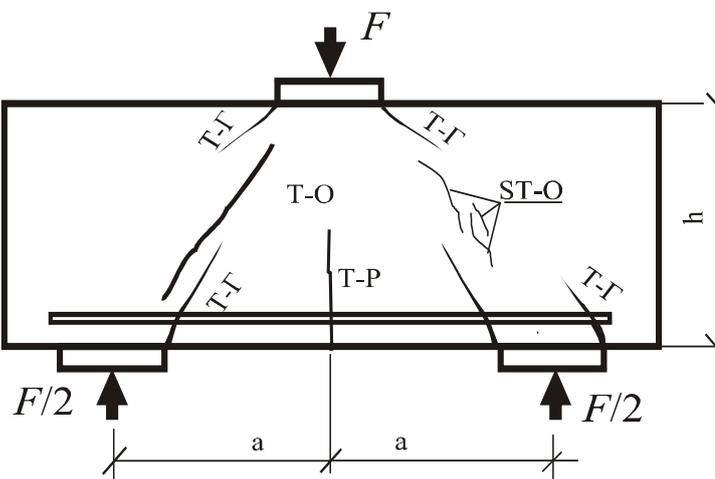


Рис. 5. Классификация трещин коротких балок

Выводы

1. Основную роль в сопротивлении коротких балок играют главные сжимающие и главные растягивающие напряжения.
 2. Особенностью напряженно-деформированного состояния коротких балок с a/h_0 от 1 до 1,5 является снижение угла наклона траекторий главных сжимающих напряжений; уменьшение ширины сжатой бетонной полосы и концентрация главных сжимающих напряжений у внутренней грани наклонной бетонной полосы.
 3. Выявлено четыре типа характерных трещин: наклонные трещины, выделяющие сжатую полосу бетона, вертикальные трещины в бетоне растянутой зоны, серия наклонных прерывистых трещин, характерных при раздавливании бетона, и наклонные трещины, расположенные внутри сжатой наклонной полосы.
 4. В балках с пролетом среза a/h_0 от 1 до 1,5 также, как и в балках с $a/h_0 \leq 1$ выявлено два вида разрушения – разрушение по наклонной сжатой бетонной полосе и по растянутому арматурному поясу.
 5. В балках, армированных распределенной арматурой в виде горизонтальных и вертикальных хомутов, при изменении пролета среза от 1 до 1,5 разрушающее усилие увеличивается в 1,4–1,65 раза, усилие образования трещин увеличивается в 1,3–1,7 раза. При этом в балках с a/h_0 от 1 до 1,5 характер образования трещин и схемы разрушения не изменяются по сравнению с балками с $a/h_0 \leq 1$.
 6. Максимальная величина раскрытия трещин в коротких балках без распределенной арматуры изменяется от 0,8 до 1,3 мм при увеличении a/h_0 от 0,75 до 1,5.
 7. Максимальная величина раскрытия трещин в коротких балках, армированных распределенной арматурой в виде вертикальных хомутов, изменяется от 0,6 до 0,8 мм при изменении a/h_0 от 1 до 1,5.
 8. Максимальная величина раскрытия трещин в коротких балках, армированных распределенной арматурой в виде горизонтальных хомутов, изменяется от 0,9 до 1 мм при изменении a/h_0 от 1 до 1,5.
- Определенные схемы разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок учтены при составлении норм проектирования.

Результаты экспериментальных исследований

Серия образцов	Марка образцов	a/h_0	μ_s , %	μ_{sw} , %	R_{bn} , кг/см ²	F_{crc} накл. тр., кг · 10 ⁻³	Тип наклонной трещины	F_{crc} верт. тр., кг · 10 ⁻³	F_{test} , кг · 10 ⁻³	Вид разрушения
I	Б-1	0,25	0,85	0	220	46	Т-О	–	53	по сжатой зоне
	Б-2	0,5				45	Т-О	45	75	по сжатой зоне
	Б-3	0,75				40	Т-Г	34	82	по сжатой зоне
	Б-4	1,0				35	Т-Г	22	60	по сжатой зоне
	Б-5	1,25				28	Т-Г	18	54	по сжатой зоне
	Б-6	1,5				23	Т-Г	14	51,8	по сжатой зоне
II	Б-7	1,0	0,85	1,2	127	45	Т-Г	30	93	по сжатой зоне
	Б-8	1,5				37,5	Т-Г	27	56	по сжатой зоне
III	Б-9	1,0	0,85	1,2	257	50	Т-Г	40	87	по растянутой зоне
	Б-10	1,5				–	–	20	50	по растянутой зоне

Список литературы

1. Снежкина, О.В. Прочность и трещиностойкость балок с малым и средним пролетом среза: дис. ... канд. техн. наук / О.В. Снежкина. – Пенза, 1998. – 158 с.
2. Баранова, Т.И. Гармонизация методов расчета железобетонных балок с различным пролетом среза / Т.И. Баранова, О.В. Снежкина // Вестник отделения строительных наук РААСН. – М., 1998. – Вып. 2. – С.41–45.

3. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №1(10). – С.4–9.
4. Гарькина, И.А. Управление в сложных технических системах: методологические принципы управления / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1(12). – С.39–43.
5. Будылина, Е.А. Основные принципы проектирования сложных технических систем в приложениях / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, А.С. Махонин // Молодой ученый. – 2013. – №5. – С.42–45.
6. Снежкина, О.В. Эффективность поперечной арматуры в железобетонных балках / О.В. Снежкина, Э.В. Егинов // Изв. Тульского гос. ун-та. – Тула, 2001. – Вып. 2. – С.116–120.
7. Снежкина, О.В. Короткие балки. Моделирование физической работы: моногр. / О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 124 с.
8. Корнюхин, А.В. Экспериментально-теоретические исследования толстых плит: моногр. / А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова, О.В. Снежкина. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 132 с.

References

1. Snezhkina, O.V. The strength and fracture toughness of girders with small and medium shear span: Dis. ... Ph.D./ O.V. Snezhkina. – Penza, 1998. – 158 p.
2. Baranova, T.I. The Harmonization of methods of calculation of reinforced concrete girders with different span slice / T.I. Baranova, O.V. Snezhkina // Bulletin of the Building Sciences Department of RAASN. – M., 1998. – Issue 2. – P.41–45.
3. Skachkov, Y.P. Modification of the method of PATTERN to the solution of the architecture-and-construction issues / Y.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and construction. – 2011. – №1(10). – P.4–9.
4. Garkina, I.A. Management in complex technical systems: methodological principles of management / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and construction. – 2012. – №1(12). – P.39–43.
5. Budilina, E.A. Main principles of designing of complex technical systems in the applications / E.A. Budilina, I.A. Garkina, A.M. Danilov, A.S. Makhonin // Young scientist. – 2013. – №5. – P.42–45.
6. Snezhkina, O.V. Efficiency of the transverse reinforcement in concrete beams / O.V. Snezhkina, E.V. Eginov // News of the Tula state University. – Tula, 2001. – Issue 2. – C.116–120.
7. Snezhkina, O.V. Short beams. Modelling of physical work: monography / O.V. Snezhkina, A.V. Kornyuhin, M.V. Kochetkova. – Penza: PGUAC, 2011. – 124 p.
8. Kornyuhin, A.V. Experimental and theoretical studies of thick plates: monography / A.V. Kornyuhin, M.V. Kochetkova, O.V. Snezhkina. – Penza: PGUAC, 2013. – 132 C.

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

Туманов Вячеслав Александрович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: tumanovpguas@list.ru

Абрашитов Валентин Султанович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

Туманов Антон Вячеславович,
кандидат технических наук, старший
преподаватель кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: tumanovpguas@list.ru

ООО «Союзпроект»

Россия, 440008, г. Пенза, ул. Ворошилова, д. 18А
e-mail: souc58@mail.ru

Абрашитов Николай Валентинович,
главный инженер

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Tumanov Vyacheslav Aleksandrovich,
Dotor of Sciences, Professor of the department
«Building constructions»
E-mail: tumanovpguas@list.ru

Abrashitov Valentin Sultanovich,
Candidate of Sciences, Professor of the
department «Building constructions»

Tumanov Anton Vjacheslavovich,
Candidate of Sciences, The senior teacher
department «Building constructions»
E-mail: tumanovpguas@list.ru

LLC «Souzproekt»

Russia, 440008, Penza, 18A, Voroshilov St.,
e-mail: souc58@mail.ru

Abrashitov Nikolay Valentinovich,
chief engineer

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОДСТРОПИЛЬНОЙ СТАЛЬНОЙ ФЕРМЫ ПРОЛОТОМ 12 М

В.А. Туманов, В.С. Абрашитов, А.В. Туманов, Н.В. Абрашитов

Излагается метод натурального испытания типовой стальной фермы покрытия производственного здания по второму предельному состоянию. Приводятся расчетные формулы и конструкция, с помощью которой производились испытания.

Ключевые слова: ферма, испытания, покрытие, прогиб, предельный.

NATURAL TESTS OF NOTBEARING STEEL FARM WITH 12 M FLIGHT

V.A. Tumanov, V.S. Abrashitov, A.V. Tumanov, N.V. Abrashitov

The method of natural test of a typical steel farm of industrial building covering on the second limiting condition is stated. Design formula and structure and for testing are given.

Keywords: farm, tests, covering, deflection, limiting.

При строительстве многопролетных производственных зданий возникает необходимость устройства подстропильных ферм при шаге колонн 12 м. Специалистами ООО «Союзпроект» (г. Пенза) была запроектирована индивидуальная стальная подстропильная ферма пролетом 12 м для типового проектирования. При применении данной подстропильной фермы для одного из производственных зданий было предложено выполнить испытание конструкций фермы по второму предельному состоянию в соответствии с требованиями СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».

Испытание металлической подстропильной фермы (рис. 1) одного из производственных зданий в натуре предполагало нагрузить конструкции покрытия распределенной нагрузкой от собственного веса плит покрытия типа ПК 60-15 по приведенной на рис. 2 схеме. Количество плит на покрытии для создания полной расчетной нагрузки на подстропильную ферму по расчету должно составлять 18 шт. Схема раскладки данных плит по покрытию представлена на рис. 3.

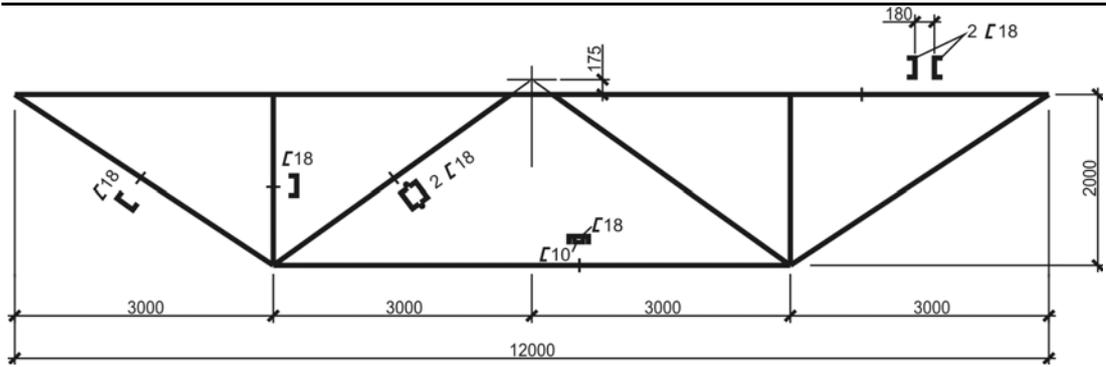


Рис. 1. Схема стропильной фермы

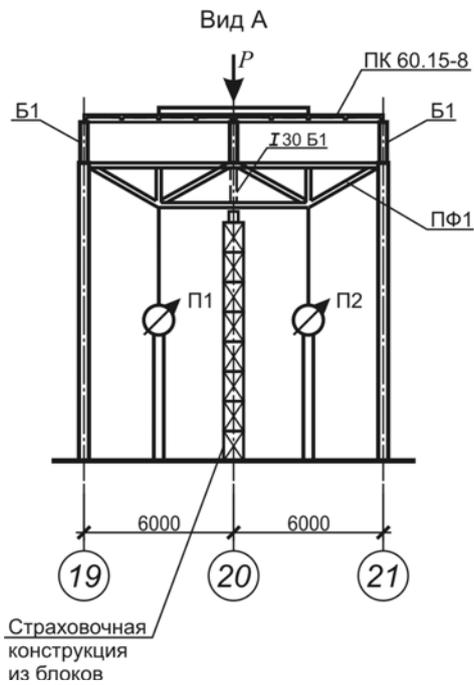
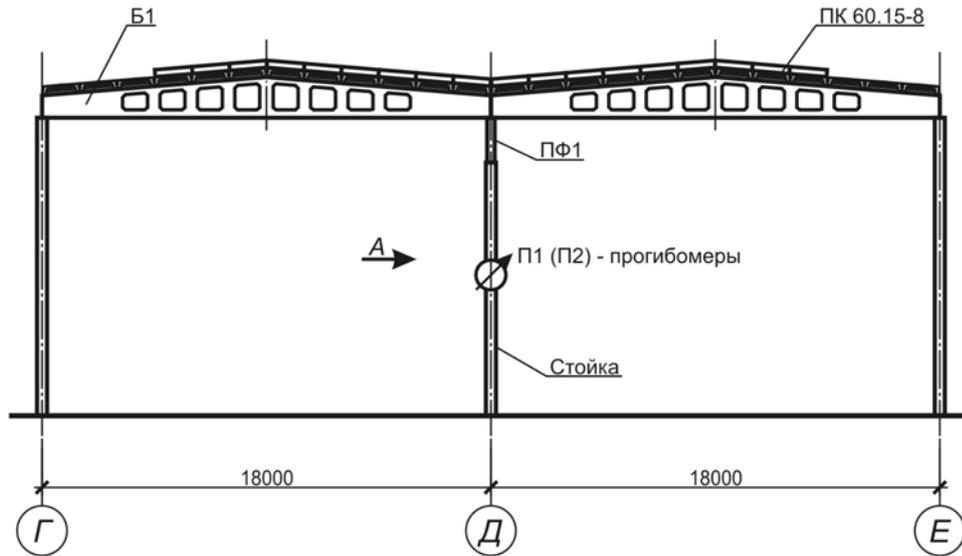


Рис. 2. Схема испытания подстропильной фермы

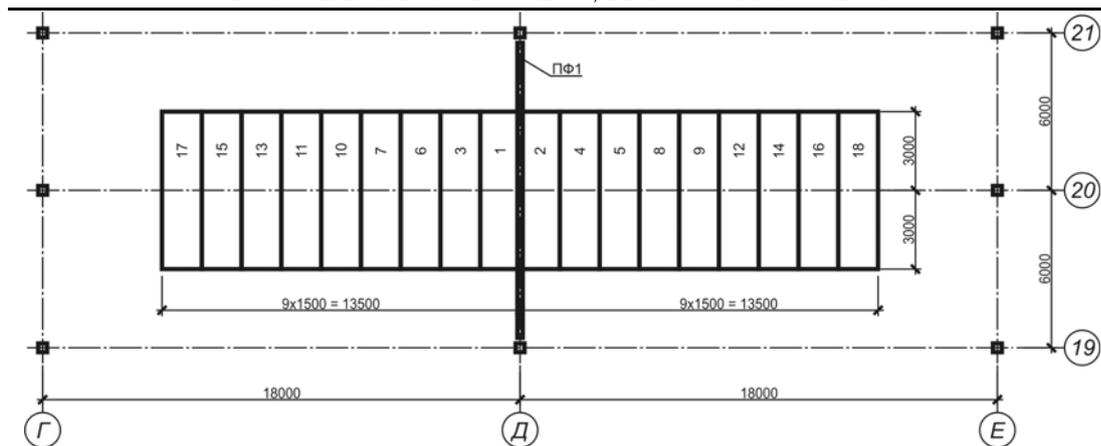


Рис. 3. Схема раскладки плит покрытия при испытании фермы

Натурное испытание металлической подстропильной фермы пролетом $L = 12$ м выполнено в производственном здании длиной 120 м, имеющем пять пролетов по 18 м. В здании установлены колонны с шагом 6 м и 12 м; между колоннами с шагом 12 м уложены металлические подстропильные фермы, на которые опираются в середине пролета железобетонные балки покрытия пролетом 18 м типа ЗБДР18-5АтVт по серии 1.462.1-3/80. Вес железобетонных балок покрытия $G = 12100$ кгс. По балкам покрытия смонтированы ребристые железобетонные плиты покрытия типа $\frac{\text{ПНС} - 12}{1,5 \times 6,0}$ по серии

ПК-01-111 с собственным весом $G = 1420$ кгс.

Элементы фермы выполнены из прокатного швеллера $\text{L}18$ по ГОСТ 8249-89. Нижний пояс усилен швеллером $\text{L}10$. Все стержни и фасонки фермы выполнены из стали С345-3 по ГОСТ 27772-88.

Фасонки и ребра жесткости приняты толщиной 10 мм, опорные плиты – 20 мм. Средние раскосы фермы установлены с эксцентриситетом 175 мм. Оба раскоса сжаты и возникающие изгибающие моменты в узле должны быть теоретически уравновешены. Подстропильная ферма запроектирована согласно СНиП II-23-81* с запасом по прочности до 5 %. С целью проверки несущей способности фермы по предельным состояниям выполнено натурное ее испытание. К нижнему поясу фермы были подвешены два прогибомера типа 6-ПАО по ТУ 4273-095-00221190-2006 с ценой деления 0,01 мм. Нагрузка на подстропильную ферму прикладывалась в виде установки поверху ребристых плит железобетонных пустотных плит типа ПК 60.15-8 с собственным весом $G = 2800$ кгс.

Испытательную расчетную нагрузку на подстропильные фермы покрытия предполагалось создать укладкой пустотных железобетонных плит типа ПК 60.15-8 с количеством плит для создания полной расчетной нагрузки на покрытие в сумме 18 шт. При такой раскладке плит имитировалась нагрузка от снега в размере 180 кгс/м^2 и нагрузка от кровли здания в размере до 150 кгс/м^2 .

Схема испытания подстропильной фермы показана на рис. 2. С целью исключения внезапного обрушения покрытия была установлена страховочная конструкция.

На рис. 3 приведена схема раскладки пустотных плит покрытия, используемых в качестве нагрузки.

На момент испытания фермы на здании были смонтированы только плиты покрытия. Нагрузки от рулонного ковра, утеплителя, стяжки, пароизоляции и снега приняли в виде пустотных плит. На первом этапе создания нагрузки на покрытие были уложены 12 плит с собственным весом от каждой плиты $314,2 \text{ кг/м}^2$ (около 65 % от расчетной экспериментальной нагрузки). Выдержка под нагрузкой первого этапа составила двое суток. После догрузки покрытия полной расчетной нагрузкой от 18 пустотных плит выдержка под нагрузкой продолжалась шесть суток. В результате тщательного осмотра фермы повреждения в несущих конструкциях и пластические

деформации в элементах фермы не обнаружены. После разгрузки подстропильная ферма вернулась в исходное положение.

Предельный прогиб для подстропильной фермы, принимаемый равным в соответствии с пунктом 2а таблицы 19 СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия», составляет $\frac{l}{250} = \frac{12000}{250} = 48$ мм.

Теоретический прогиб конструкции определялся по формуле

$$f = \frac{M^H \cdot l^2}{10 \cdot E \cdot J}.$$

При этом при имеющихся геометрических характеристиках поясов фермы, а также стоек и раскосов момент инерции фермы был определен по формуле

$$J = \mu [J_{н.п} + J_{в.п} + A_{н.п} \cdot z_1^2 + A_{в.п} \cdot z_2^2] = 0,9 [2 \cdot 1090 + 86 + 20,4 + 31,6 \cdot 120,4^2 + 41,4 \cdot 92,5^2] = 733134,5 \text{ см}^4,$$

где $\mu = 0,9$; $A_{н.п} = 31,6 \text{ см}^2$; $z_1 = 120,4 \text{ см}$; $A_{в.п} = 41,4 \text{ см}^2$; $z_2 = 92,5 \text{ см}$.

Максимальный нормативный изгибающий момент, действующий на подстропильную ферму от испытательной нагрузки, составит:

$$M_{\max}^H = \frac{p^H \cdot l}{4} = \frac{53549 \cdot 12}{4} = 160647 \text{ кгс}\cdot\text{м},$$

где p^H – полная нормативная нагрузка на подстропильную ферму, $p^H = 53549$ кгс.

Тогда имеем теоретический прогиб подстропильной фермы от полной нагрузки равным:

$$f = \frac{16064700 \cdot 1200 \cdot 1200}{10 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 733134,5} = 1,503 \text{ см}.$$

При натурном же испытании подстропильной фермы от опытной нагрузки максимальный прогиб фермы составил не более 8 мм, а с учетом нагрузки от собственного веса конструкций:

$$f_{\max}^H = \frac{8}{0,634} = 12,6 \text{ мм}.$$

При натурном испытании подстропильной фермы максимальный прогиб в середине фермы составил $f_{\max}^H = 12,6$ мм, что очень близко к значению теоретического прогиба и меньше предельного прогиба, установленного строительными нормами.

Вывод

По результатам натурального испытания типовой металлической подстропильной фермы покрытия производственного здания по второму предельному состоянию считаем ее состояние исправным и способным воспринимать действующие на подстропильную ферму расчетные эксплуатационные нагрузки в размере не более 550 кгс/м^2 .

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

Нежданов Кирилл Константинович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»,
заслуженный изобретатель России,
почетный строитель

Антонов Сергей Анатольевич,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: muka-servis58@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

Nezhdanov Kirill Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Building construction»,
Deserve inventor of Russia, honorary builder

Antonov Sergey Anatolyevich,
Postgraduate of the department «Building
construction»

E-mail: muka-servis58@mail.ru

КОНСТРУКЦИЯ СПИРАЛЬНОГО ВИАДУКА

К.К. Нежданов, С.А. Антонов

Решена проблема разгрузки существующих транспортных магистралей путём устройства трассы автомобильной дороги на местности с большим перепадом высотных отметок земляной поверхности. Получено новое конструктивное решение спирального виадука.

Ключевые слова: спиральный виадук, винтовой участок, конструкция.

DESIGN OF A SPIRAL VIADUCT

K.K. Nezhdanov, S.A. Antonov

The problem of existing transport highways unloading by means of constructing of a highway on the land with big difference of high-rise marks of earth surface is solved. A new constructive solution of a spiral viaduct is designed.

Keywords: spiral viaduct, screw site, construction.

Спиральный виадук предназначен для устройства трассы автомобильной дороги на местности с большим перепадом высотных отметок земляной поверхности и относится к области проектирования сооружений в особых условиях (с беспокойным естественным рельефом). С его помощью предлагается решить проблему разгрузки существующих транспортных магистралей. Кроме того, спиральный виадук архитектурно выразителен.

Сооружение такого рода уникально по своему конструктивному решению. Техническая задача сооружения – соединение одной части земляной поверхности с другой со следующими показателями:

- Ускорение времени прохождения транспортных средств из одного района города в другой.
- Экономное расходование территории.
- Снижение материалоёмкости конструкций сооружения.
- Снижение трудоёмкости изготовления конструкций сооружения.
- Технологичные соединения конструкций сооружения.

Техническая задача по способу устройства спирального виадука решается следующим образом. Трассу сооружения прокладывают по правой винтовой спирали. Она проходит в плане по оси центральной колонны (рис.1) и поднимается на высоту 100 м. Трассу условно можно поделить на 3 участка (снизу вверх):

- участок до винтовой спирали длиной 1,5 км (из них первые 0,44 км радиусом $R=470$ м, остальной отрезок – прямолинейный);
- винтовая спираль радиусом $R=400$ м;
- прямолинейный участок после винтовой спирали длиной 0,41 км.

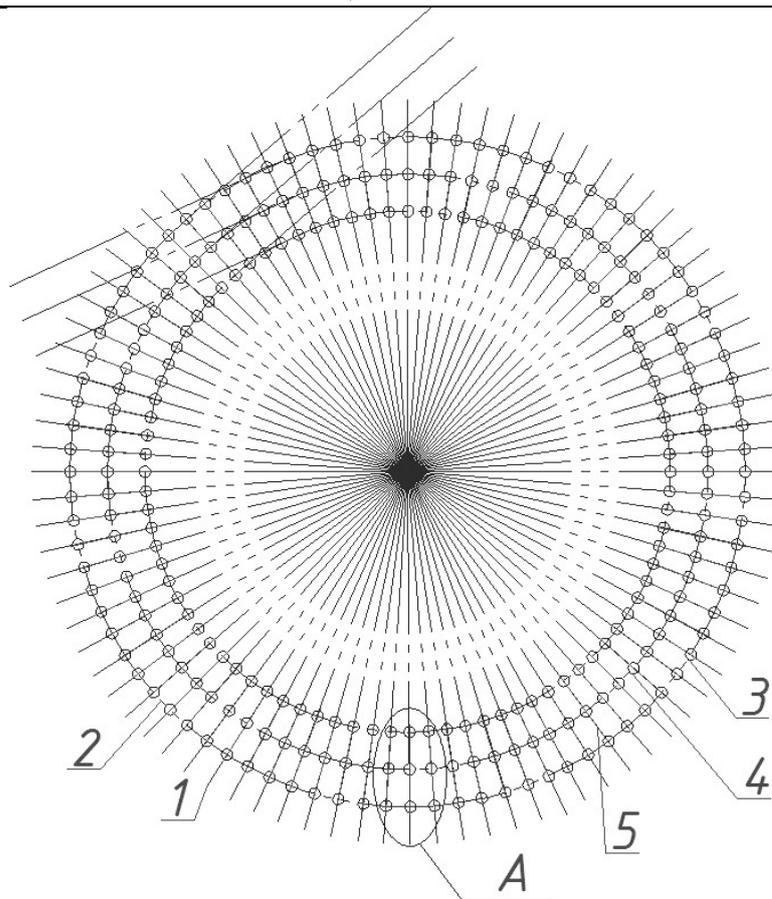


Рис. 1. План трассы спирального участка виадука

Трасса по всей длине имеет постоянный уклон, равный 15 ‰ (промилей). Протяжённость виадука около 7 км.

Данное сооружение разрабатывается для трёхполосного движения городского транспорта (в одну и в другую стороны). Расчётными временными нагрузками являются нагрузка от автотранспортных средств А11 и тяжёлая колёсная нагрузка НК-80. С двух противоположных краёв в радиальном направлении предусмотрены пешеходные тротуары и велосипедные дорожки шириной 1,5 м, выносимые на консоли балок. Габарит проезжей части $\Gamma=12,75$ м. Конструкция спирального виадука представляет собой балочную систему (рис.4), которая состоит из второстепенной и опорной балок. Второстепенная балка опирается на опорную поэтажно. Опорные балки вместе с трубобетонными колоннами образуют двухпролётную двухэтажную раму с жёсткими узлами (рис.2).

Интерес вызывает устройство винтового участка спирального виадука. В плане трасса винтового участка представляет собой спираль радиусом $R=400$ м, проходящую по оси центральных колонн 4 (диаметром 1,02 м) (см. рис. 1). Помимо центральных имеются крайние колонны 3 (диаметром 1,42 м). В плане спираль представляет собой многогранник с числом граней $n=84$.

Колонны предлагается выполнить трубобетонными составного сечения двухветвевыми. Их можно поделить на колонны первого яруса 3а и 4а и второго яруса 3б и 4б (см. рис. 2). В плане они располагаются на пересечении радиальных 1 и круговых 2 осей, проведённых из центра круга. Две крайние колонны расположены вдоль радиальных осей и равноудалены от центральной колонны на величину габарита проезжей части. Из-за большой длины трубобетонные колонны делают составными по длине (имеются монтажные стыки). Стыкование по длине осуществляется фланцевыми соединениями при помощи высокоресурсных соединений (легированные шпильки 40Х “Селект”). Фланцы привариваются к стержню колонны вместе с ребрами жёсткости с уклоном по отношению к сечению колонн.

1-1

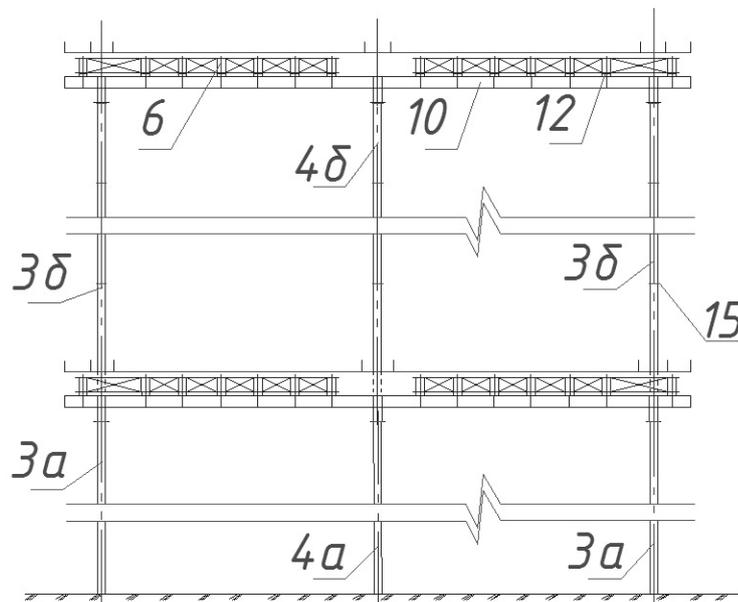


Рис. 2. Поперечный профиль спирального участка виадука

Трубобетонные колонны представляют собой огнестойкую конструкцию. В трубчатые профили вводят пустотообразователи, фиксируют их по центру круглого профиля и натягивают изнутри, например, гидравлическим или пневматическим способом. К патрубкам трубчатых профилей присоединяют шланги бетононасосов, закачивают в трубчатые профили способом «снизу вверх» пластичный мелкозернистый самоуплотняющийся при расширении бетон, повышая этим огнестойкость и прочность каркаса.

После схватывания и самоуплотнения трубобетонных элементов каркаса понижают до нуля внутреннее давление в пустотообразователях, извлекают их, оснащают сооружение температурными датчиками и системой труб для подачи воды и разбрызгивания её внутри трубчатых профилей каркаса.

В случае возникновения пожара автоматически, по сигналу от датчиков температуры, включается система разбрызгивания воды внутри трубчатых профилей каркаса и производится сток воды вниз по трубчатым профилям. Испаряясь, она охлаждает изнутри трубчатые профили каркаса. Исключается повышение температуры металла каркаса выше 120...130° по Цельсию, а также возможность пожара и обрушения металлических конструкций сооружения.

Опирающие системы балок на колонны поэтажное (рис. 3). Сверху на колонны первого яруса 3 опирают опорные балки 5 коробчатого сечения (высотой 1,59 м), которые направлены под углом к радиальным осям 1 виадука. Главное преимущество коробчатого сечения – повышенная изгибная и крутильная прочность. Соединение колонн и опорных балок жёсткое при помощи фланцевого соединения на упомянутых высокоресурсных соединениях. Опорные балки имеют одинаковую длину (достигнуто за счёт образования угла между главной балкой и радиальной осью виадука). Опорные балки 5 неразрезные двухпролётные с двумя консолями. Консоли являются несущими конструкциями пешеходных тротуаров. Из-за большой длины и для удобства транспортировки балку предлагается сделать составной с двумя монтажными стыками. Стыки по длине выполняют винтовыми в местах с близкими к нулю значениями изгибающего момента. Балка для обеспечения общей и местной устойчивости

снабжается продольными и поперечными ребрами жёсткости. В месте опирания на колонну устраиваются опорные рёбра.

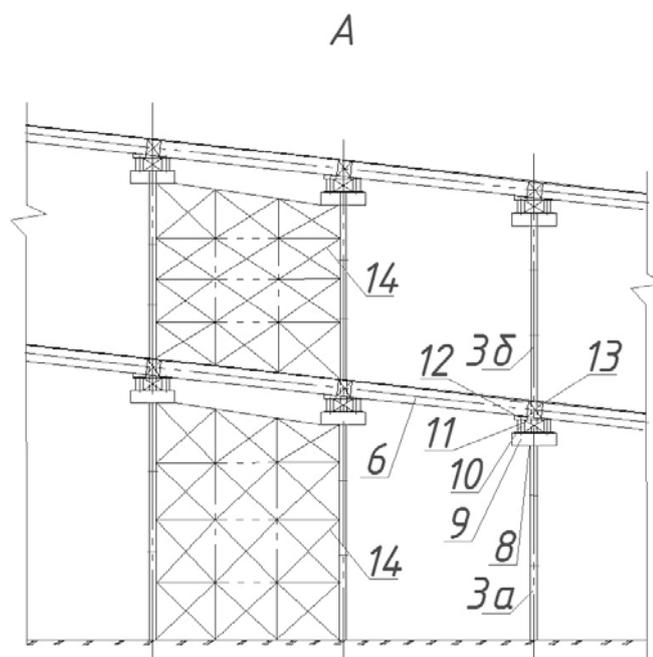


Рис. 3. Продольный профиль спирального участка виадука

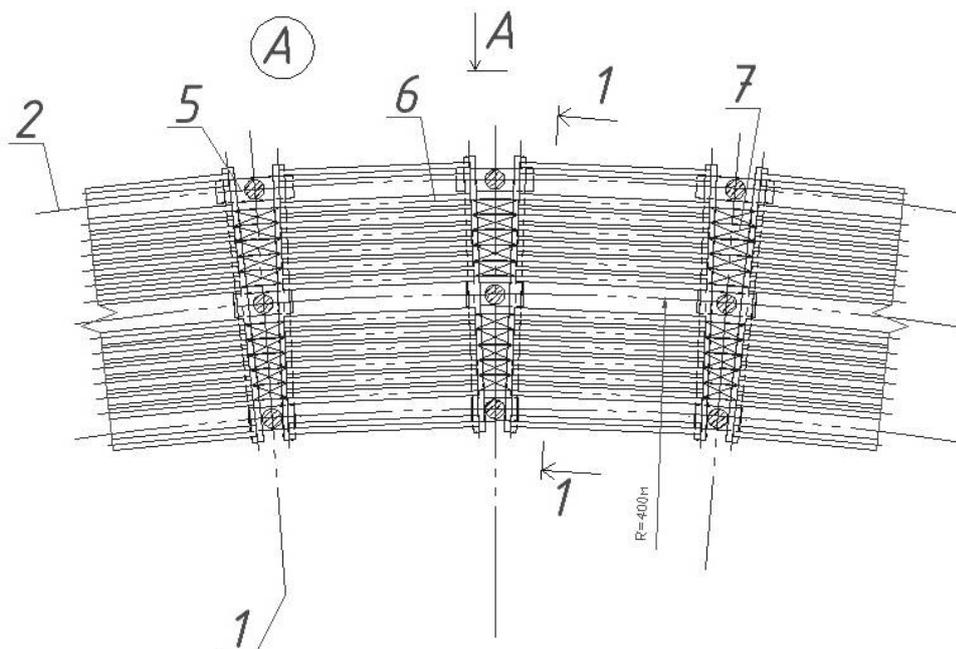


Рис. 4. План участка винтовой спирали виадука

Двухпролётные опорные балки объединяются системой связей в единую жёсткую конструкцию. В плане она представляет собой клин, острие которого ориентировано к центру круга виадука. Единую жёсткую конструкцию далее будем называть главной балкой.

Сверху на двухпролётные опорные балки 5 опирают одинаковые по длине разрезные второстепенные балки 6 (высотой 1,54 м, длиной 30 м), прямолинейные в плане (см. рис.4). Они располагаются по касательной к винтовой оси виадука. На одну

полосу движения приходится по две второстепенной балки. Соединение балок осуществляется легированными болтами 40Х “Селект”.

Сверху на опорные балки опирают колонны второго яруса 4а и 4б. Схема опирания балок на колонны второго яруса аналогична схеме опирания балок на колонны первого яруса.

Главная балка соединяется вместе с второстепенными балками в единое целое системой связей 11, 13 и стальным настилом, опирающимся на второстепенные балки. По стальному настилу прокладывается дорожное покрытие с поперечным уклоном 10 ‰ (промилей).

В двух взаимно перпендикулярных направлениях между двухветвевыми колоннами устраиваются связевые решётки 14. Благодаря связевым решёткам, системам связей между балками и дорожному настилу возникает соединение в виде жёсткого диска в уровне балок и единый ствол по колоннам. Для такого устройства виадука необходимы чувствительные фундаменты. Можно применить фундаменты на сваях, являющихся макрорегуляторами. Такая конструкция фундаментов позволяет управлять перемещениями, осадками и креном сооружения. При этом сохраняется нормальная эксплуатация виадука.

В результате получено рациональное конструктивное решение спирального виадука, позволяющее снизить материалоемкость и трудоёмкость изготовления конструкций, применить новые технологичные узлы сопряжения элементов конструкций, а также возвести архитектурно выразительный объект.

Список литературы

1. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1996. – 213 с.
2. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
3. Мосты и сооружения на автомобильных дорогах / М.Е. Гибшман, И.Е. Дедух. – М.: Транспорт, 1981. – 300 с.
4. Багдоев, С.Г. Проектирование металлического пролётного строения автодорожного моста с применением сквозных ферм: учеб.-метод. пособие / С.Г. Багдоев. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 76 с.

References

1. Construction Norms and Regulations 2.05.03-84*. Bridges and pipe / State Committee for Construction of the USSR. – M.: TsITP of the State Committee for Construction of the USSR, 1996. – 213 p.
2. Construction Norms and Regulations II-23-81*. Steel designs. Norms the design / the State Committee for Construction of the USSR. – M.: TsITP of the State Committee for Construction of the USSR, 1990. – 96 p.
3. Bridges and constructions on automobile roads / M.E.Gibshman, I.E.Dedukh. – M.: Transport, 1981. – 300 p.
4. Bagdoyev, S.G. Design of a metal flying structure of the road bridge with application of through farms: educational and methodical grant / S.G. Bagdoyev. – Penza: PGUAS, 2006. – 76 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

Нежданов Кирилл Константинович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
Кузьмишкин Алексей Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
директор Института инженерной экологии
E-mail: Kuzimishkin@yandex.ru

Гарькин Игорь Николаевич,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Nezhdanov Kirill Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Building construction»
Kuzmishkin Alexei Alexandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Director of the Institute of Environmental
Engineering
E-mail: Kuzimishkin@yandex.ru

Garkin Igor Nikolaevich,
Postgraduate of the department «Building
structures»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХСТЕНЧАТЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С АМОРТИЗИРУЮЩИМ ЭФФЕКТОМ

К.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин, И.Н. Гарькин

Рассматривается подкрановая балка с двумя амортизирующими гофрированными стенками, которая за счёт своей оригинальной конструкции существенно повышает выносливость подкрановых конструкций.

Ключевые слова: подкрановая балка, двухстенчатая подкрановая балка, амортизация, повышение выносливости.

APPLICATION OF TWO WEB CRANES BEAMS WITH SHOCK ABSORBING EFFECT

K.K. Nezhdanov, A.A. Kuzmishkin, I.N. Garkin

The authors consider the crane beam with two damping corrugated walls, which due to its original construction significantly improves crane structures endurance.

Keywords: crane beams, dvuhstenchataya crane beam, amortization, increased stamina.

Актуальной проблемой для зданий тяжёлой промышленности является увеличение срока службы подкрановых балок как сложных систем и повышение их эксплуатационных свойств и ресурса [1-4].

Металлические подкрановые конструкции, содержащие горизонтальные пояса из уголкового профиля с двумя стенками и опорными рёбрами, снабжённые в верхней части низко модульной прокладкой в виде криволинейного гофра и низко модульной вставкой в зоне верхнего пояса, были рассмотрены в [5]. В дальнейшем модернизированы и улучшены в лаборатории выносливости ПГУАС.

Балка (рис. 1) содержит верхний 1 и нижний 2 пояса, соединённые фрикционными высокопрочными болтами с гарантированным натягом со стенками. Стенки в верхней части образуют продольный горизонтальный гофр 4 с высотой волны, равной 20...10 толщине стенки, посредством вставленной между ними прокладки 5. Между стенками балки в зоне верхнего пояса имеется низко модульная вставка 6. Опорные усилия от балки передаются с помощью амортизирующих рёбер 7, выполненных из пластинчатых рессор и установленных под углом 45...60° к продольной оси балки. В средней части рёбер имеется распорка 8, придающая пластинам криволинейное очертание.

Податливость опорных рёбер обеспечивается соотношением длины d , толщины t и ширины b пластин. Соотношение принимается в пределах $b = (10...20)t$.

Опорные рёбра (рис. 2) верхней частью присоединяются к уголкам 9, поддерживающим верхний пояс, а нижней частью присоединяются через тавровый упор 10 к нижнему поясу балки.

Каждая из рессор снабжена распорной шпилькой, регулирующей податливость. Рессоры рёбер верхней частью присоединены к уголкам, подкрепляющим верхний пояс, а нижней частью через тавровые упоры – к нижнему поясу балки.

Гофры в стенке образованы при механизированной гарантированной затяжке шпилек. В опорные рёбра встроены рессоры, гасящие внешние подвижные циклические воздействия колёс мостовых кранов.

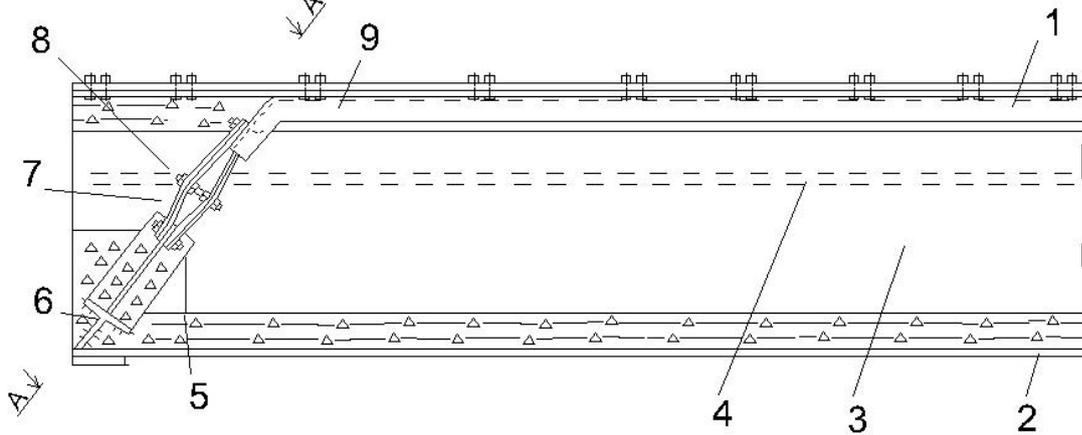


Рис.1. Сечение балки с поясами из тавров:

- 1 – верхний пояс; 2 – нижний пояс; 3 – стенка из двух листов; 4 – гофры в её стенках;
5 – прокладка по всей длине балки; 6 – низко модульная вставка между стенок

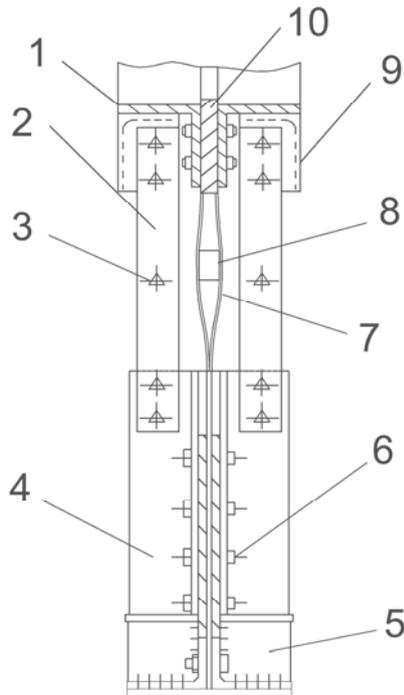


Рис.2. Опорные амортизирующие рёбра:

- Вид А-А балки: 1 – балка; 2 – амортизирующие опорные рёбра; 3-регулятор распора в ребре;
4 – жесткая часть ребра; 5 – упор; 6 – шпильки с гарантированным натягом; 7 – стенка из двух листов; 8 – прокладка, образующая гофр; 9 – уголок, подкрепляющий верхний пояс;
10 – низко модульная прокладка

Пояса соединены между собой двумя стенками 3 гофра 4, расположены в верхней четверти стенок. Волна гофра высотой 20...10 толщин стенки образована по всей длине её.

Опираие балки происходит через рёбра 5, имеющие податливость вдоль рёбер. Нижняя часть рёбер жёсткая, состоит из уголков. Податливые верхние части рёбер 6 выполнены из листовых рессор, состоящих из чётного числа криволинейных рессор, расположенных выпуклостью, направленной в противоположные стороны и соединённых нижними концами с нижними частями опорных рёбер, а верхними – с поясом балки.

Вставка выполнена из чугуна или базальта, имеющего меньший модуль упругости по сравнению со сталью примерно в 2 раза. Между стенками, в четверти высоты стенки, зажата прокладка. При затяжке болтов поясов прокладка взаимодействует со стенками, упруго выгибая их гофрами наружу.

Устойчивость стенок обеспечивается за счёт цилиндрической поверхности. Опорные рёбра такой балки не должны сковывать верхнюю часть стенки в вертикальном направлении и должны обладать амортизирующими свойствами (рис. 3).

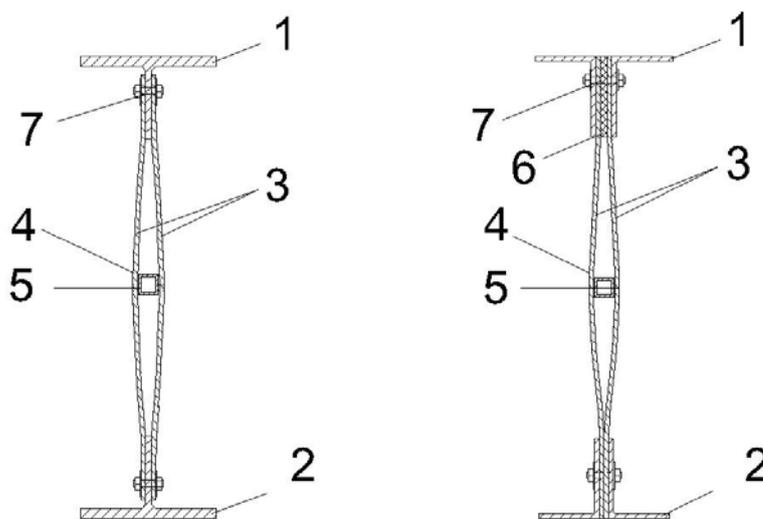


Рис.3. Вариант двухстенчатой балки

Для демфирования колебаний локальных подвижных крутящих моментов, генерируемых колёсами кранов и передающихся на стенку балки, балка снабжена двумя амортизирующими гофрированными стенками.

Пояса у балки с двумя стенками выполнены из прокатных тавров. В верхней зоне стенки разделены стенкой тавра. Шпильки, соединяющие стенку тавра и стенки балки, затянуты с гарантированным натягом.

Разработанная конструкция обладает всеми преимуществами балки с верхним поясом из прокатных уголков и с податливой стенкой. Две стенки легко воспринимают колебания локальных подвижных крутящих моментов. Выносливость новых балок по сравнению с выносливостью обычных сварных повышается в 10 раз. Рекомендуются для использования в цехах черной и цветной металлургии для кранов с тяжелым режимом работы.

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. – М., 2013. – №3. – С.69–75.

2. Данилов, А.М. Защита от удара и сопровождающей вибрации: экспоненциально-тригонометрическая аппроксимация функций / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №3 (14). – С.85–89.

3. Нежданов, К.К. Трёхглавый рельсовый блок для подкрановых балок / К.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1. – С.66–68.

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

5. Нежданов К.К. Патент № 1625811 Металлическая подкрановая балка: а. с. СССР: М. Кл. В 66 С 6/00 / К.К. Нежданов, С.К. Нежданов // Бюл.№5. – 1991.

References

1. Nezhdanov, K.K. Prefabricated crane beams of rolled profiles / K.K. Nezhdanov, A.S. Lashtankin, I.N. Garkin // Structural Mechanics and calculation constructions.– М., 2013. – № 3 – P.69–75.

2. Danilov, A.M. Protection from shock and vibration is accompanied by: the exponential-trigonometric function fitting / A.M. Danilov, I.A. Garkina, I.N. Garkin // Regional architecture and construction. – 2012. – № 3 (14). – P.85–89.

3. Nezhdanov, K.K. Three-headed rail unit for crane beams / K.K. Nezhdanov, A.A. Kuzmishkin, I.N. Garkin // Regional Architecture and construction. – 2012. – № 1. – P.66–68.

4. System methodology, system identification and control theory: industrial and aerospace applications / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Lapshin, N.K. Jurkov // News of higher educational institutions. Volga region. Engineering – 2009. – № 1. – P. 3–11.

5. Nezhdanov, K.K. Patent № 1625811 Metal crane beam: a. s. USSR: M. Cl. In 66 C 6/00 / K.K. Nezhdanov, S.K. Nezhdanov // Bul. № 5 – 1991.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 51-7

*Московский государственный
машиностроительный университет*
Россия, 107023, Москва, ул. Большая
Семеновская, 38,
тел.: 8 (495) 223-05-23

Будылина Евгения Александровна
кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель кафедры
«Информационные системы и
дистанционные 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 State University of mechanical
engineering*
Russia, 107023, Moscow, 38, Bolshay
Semenovskaya St.,
tel.: 8 (495) 223-05-23

Budylna Evgeniya Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Senior lector of the department
«Informational systems and distance
technology»
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

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРИЛОЖЕНИЯХ

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

Предлагается подход к декомпозиции динамических систем, описываемых системой обыкновенных дифференциальных уравнений, с использованием корневых годографов для сужения области моделирования. Обсуждаются возможности приложений с иллюстрацией на конкретных примерах.

Ключевые слова: динамические системы, декомпозиция, сужение области моделирования.

DECOMPOSITION OF DYNAMIC SYSTEMS IN APPLICATIONS

Е.А. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

An approach to the decomposition of dynamic systems described by system of ordinary differential equations using the roots of the characteristic polynomial to narrow the field of modeling is suggested. The possibilities of applications are illustrated on the specific examples.

Keywords: dynamic systems, decomposition, narrowing the field of modeling.

Математическая модель динамической системы считается заданной, если введены параметры (координаты) системы, однозначно определяющие ее состояние, и указан закон эволюции, описывающий изменение начального состояния с течением времени. Последний часто задается системой обыкновенных дифференциальных уравнений; в простейшем случае – совокупностью обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши с достаточно гладкими правыми частями, обеспечивающими существование и единственность решения. В более сложном – системой обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши и нелинейных алгебраических уравнений. В частности, кинетический процесс формирования физико-механической характеристики материала обычно определяется как решение задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения [1]; аналогично определяется вид бокового или продольного движения летательного аппарата [2] и др.

Одной из актуальных задач при моделировании является *определение требуемой области моделирования и возможностей ее сужения*, например, с учетом аperiodичности или колебательности процессов для уменьшения объема дополнительных исследований. Наиболее естественным для решения этих задач является использование корневых годографов. Проиллюстрируем предлагаемый подход на примере модели четвертого порядка.

Определим условия действительности корней характеристического полинома

$$\Delta(p) = p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad a_i > 0, \quad i = \overline{0,3}. \quad (1)$$

Если полином имеет две пары комплексно-сопряженных корней, то при декомпозиции системы используется соотношение

$$\Delta(p) = (p^2 + 2\alpha p + \delta) (p^2 + 2\mu p + \gamma) \quad (2)$$

(например, короткопериодической составляющей продольного движения соответствует $p^2 + 2\alpha p + \delta$, а длиннопериодической – $p^2 + 2\mu p + \gamma$).

Из $a_3 > 0$ следует, что хотя бы одна из двух пар комплексно-сопряженных корней имеет отрицательную действительную часть.

Справедливо:

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= -\alpha \pm i\beta, \quad \beta = \sqrt{\delta - \alpha^2}, \quad p_{3,4} = -\mu \pm i\nu, \quad \nu = \sqrt{\gamma - \mu^2}; \\ \alpha_3 &= 2(\alpha + \mu), \quad a_2 = \gamma + \delta + 4\alpha\mu, \quad a_1 = 2(\alpha\gamma + \mu\delta), \quad a_0 = \gamma\delta. \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда получим систему нелинейных уравнений для определения α , δ , μ , γ при известных a_0, a_1, a_2, a_3 :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{a_3}{2} - \mu, \\ \delta &= (a_2 - 4\alpha\mu) - \gamma, \\ \mu &= \frac{a_1 - a_3\gamma}{2(a_0 - \gamma^2)}\gamma; \\ \gamma &= \frac{1}{2} \left[(a_2 - \tau) - \sqrt{(a_2 - \tau)^2 - 4a_0} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

(воспользовались очевидными соотношениями $\gamma = a_2 - \frac{a_0}{\gamma} - \tau$, $\gamma^2 - (a_2 - \tau)\gamma + a_0 = 0$,

$\gamma + \delta = a_2 - 4\alpha\mu$; принято $\tau = 4\alpha\mu$).

При решении системы (4) можно воспользоваться любым из известных методов (например, методом простых итераций, методом Зейделя, методом Ньютона и др.). При декомпозиции продольного движения с учетом его специфики за нулевое приближение принималось:

$$\alpha_0 = \frac{a_3}{2} - \mu_0,$$

$$\delta_0 = a_2,$$

$$\mu_0 = \frac{a_1 - a_3 \gamma_0}{2(\delta_0 - \gamma_0)},$$

$$\gamma_0 = \frac{a_0}{a_2}$$

(в [3] принимается $\alpha = \frac{a_3}{2}$, $\delta = a_2$, $\mu = \frac{1}{2} \frac{a_1}{a_2}$, $\gamma = \frac{a_0}{a_2}$).

Первое приближение вычисляется по формулам (4). Если $\gamma + \frac{a_0}{\gamma} + 4\alpha\mu \neq a_2$, производится уточнение корня методом итераций. Вычисления прекращаются, когда достигается заданная точность равенства $\gamma + \frac{a_0}{\gamma} + 4\alpha\mu = a_2$.

Заметим, из (4) следует:

$$a_2\gamma = a_0 + \gamma^2 + 4\alpha\mu\gamma.$$

Для длиннопериодического движения γ мало и $\gamma \approx \frac{a_0}{a_2}$. Если $a_i > 0$, $a_3 a_2 > a_1$, $a_1 < a_2$, $a_2^2 > a_0$, то из

$$\mu = \frac{a_1 - a_3\gamma}{2\left(\frac{a_0}{\gamma} - \gamma\right)} \approx \frac{a_1 a_2 - a_3 a_0}{2(a_2^2 - a_0)}$$

следует $\mu > 0$ тогда и только тогда, когда $a_1 a_2 > a_0 a_3$ (основное условие устойчивости длиннопериодического движения).

В этом случае принимается

$$\mu = \frac{a_1}{2a_2}, \quad \alpha = \frac{a_3}{2} - \frac{a_1}{2a_2}, \quad \delta = \frac{a_0}{\gamma},$$

$$\tau = \frac{a_1 a_3}{a_2} - \frac{a_1^2}{a_2^2}, \quad \gamma = \frac{1}{2} \left(a_2 - \tau - \sqrt{(a_2 - \tau)^2 - 4a_0} \right).$$

Если условие устойчивости длиннопериодического движения не выполняется ($a_1 a_2 < a_0 a_3$), то

$$\mu = \frac{-a_1}{2a_2}, \quad \alpha = \frac{a_3}{2} + \frac{a_1}{2a_2}, \quad \delta = \frac{a_0}{\gamma},$$

$$\tau = -\left(\frac{a_1 a_3}{a_2} + \frac{a_1^2}{a_2^2} \right), \quad \gamma = \frac{1}{2} \left(a_2 - \tau - \sqrt{(a_2 - \tau)^2 - 4a_0} \right).$$

Укажем далее достаточные условия отсутствия действительных корней у характеристического уравнения

$$\Delta(p) = p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad a_i > 0, \quad i = \overline{0, 3}.$$

Теорема. Если выполнено одно из условий:

1. $a_0 > a_1$, $a_2 > \frac{a_3^2 + a_1}{4}$;
2. $a_0 > a_1$, $a_2 > \max \left\{ \frac{3}{8} a_3^2, \frac{a_1^3 + 3a_0^2 a_3}{2} \right\}$,

то уравнение $\Delta(p) = 0$ не имеет действительных корней ($\Delta(p) > 0 \forall p \in (-\infty, \infty)$).

Действительно, неравенство

$$a_2 > \frac{a_3^2 + a_1}{4}$$

эквивалентно неравенству

$$p^2 + a_3p + a_2 > \frac{a_1}{4}$$

для всех $p \in (-\infty, \infty)$.

Из $a_0 > a_1$ следует: $a_1p + a_0 > a_1p + a_1$.

Отсюда

$$\begin{aligned} p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0 &> p^2(p^2 + a_3p + a_2) + a_1p + a_1 > \\ &> \frac{a_1p^2}{4} + a_1p + a_1 = p^2(p+2)^2 \frac{a_1}{4} \geq 0. \end{aligned}$$

Таким образом, если выполнено условие 1, то утверждение теоремы доказано.

При выполнении условия 2 имеем: $p^2(p^2 + a_3p + a_2) + a_1p + a_0$.

Из $a_2 > \frac{3}{8}a_3^2$ следует: $p^2 + a_3p + a_2 > 0$ для $p \in (-\infty, \infty)$.

При $p \geq -\frac{a_0}{a_1}$ имеем: $p^2(p^2 + a_3p + a_2) + a_1p + a_0 > 0$.

Из $a_2 > \frac{3}{8}a_3^2$ следует: $\Delta''(p) = 12p^2 + 6a_3p + 2a_2 > 0$.

Из условия $a_2 > \frac{(a_1^3 + 3a_0^2a_3)}{2}$ следует:

$$\Delta'\left(-\frac{a_0}{a_1}\right) = a_1 - \frac{a_0}{a_1} \left(4\frac{a_0^2}{a_1^2} - 3a_3\frac{a_0}{a_1} + 2a_2 \right) < 0;$$

минимум $\Delta(p)$ правее точки $p = -\frac{a_0}{a_1}$. Но выше было показано, что при

$p > -\frac{a_0}{a_1}$ имеем $\Delta(p) > 0$ (рис.1).

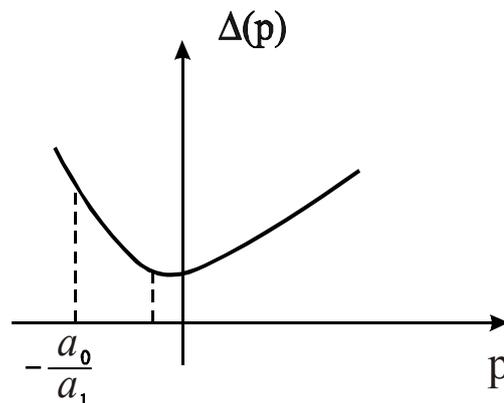


Рис.1. Вид зависимости $\Delta(p)$

Из $a_3 > 0$ следует, что хотя бы одна из двух пар комплексно-сопряженных корней имеет отрицательную действительную часть.

При настройке сложных систем для прогнозирования результатов эффективно можно использовать нижеприведенные *теоремы о существовании действительных корней полинома*

$$P_4(x) = x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0, \quad a_i > 0, i = \overline{0,3}.$$

Теорема 1. Пусть коэффициенты $P_4(x)$ неотрицательны и $a_0 > a_1$, $4a_2 \geq a_1 + a_3^2$. Тогда многочлен не имеет действительных корней.

Действительно, неравенство $4a_2 \geq a_1 + a_3^2$ эквивалентно неравенству $x^2 + a_3x + a_2 \geq \frac{a_1}{4}$ для любого x (в этом легко убедиться, вычислив дискриминант уравнения $x^2 + a_3x + a_2 = \frac{a_1}{4}$).

Нижеследующая цепочка очевидных неравенств приводит к неравенству, эквивалентному утверждению теоремы:

$$\begin{aligned} P_4(x) &= x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = x^2(x^2 + a_3x + a_2) + a_1x + a_0 \geq \\ &\geq \frac{a_1}{4}x^2 + a_1x + a_0 > \frac{a_1}{4}(x^2 + 4x + 4) > 0. \end{aligned}$$

Теорема 2. Пусть для коэффициентов многочлена $P_4(x)$ выполнено неравенство $3a_3^2 > 8a_1$, и x_1, x_2, x_3 – действительные различные (в порядке возрастания) корни многочлена $x^3 + 0,75a_3x^2 + 0,5a_2x + 0,25a_1$. Тогда:

- если $P_4(x_1) > 0$ и $P_4(x_3) > 0$, то $P_4(x)$ действительных корней не имеет;
- если $P_4(x_2) < 0$, то $P_4(x)$ имеет два различных действительных корня;
- если $P_4(x_1) \leq 0$, $P_4(x_2) \geq 0$, $P_4(x_3) \leq 0$, то $P_4(x)$ имеет четыре действительных корня (возможно кратные, если хотя бы одно из неравенств нестрогое).

Теорема 3. Пусть выполнено неравенство $3a_3^2 \leq 8a_1$ и x_1 – действительный корень многочлена $x^3 + 0,75a_3x^2 + 0,5a_2x + 0,25a_1$ (в этом случае действительный корень единственный, возможно, кратный). Тогда:

- если $P_4(x_1) \leq 0$, то $P_4(x)$ имеет либо два различных действительных корня, либо один кратный;
- если $P_4(x_1) > 0$, то $P_4(x)$ действительных корней не имеет.

Доказательства теорем 2, 3 не представляют труда, если обратиться к графикам на рис. 2.

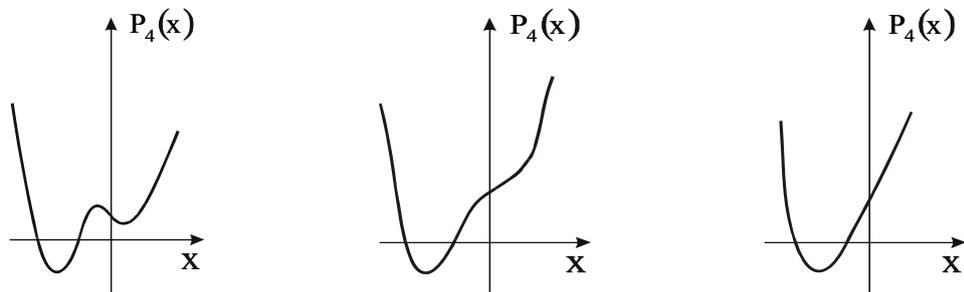


Рис.2. Вид $P_4(x)$

Графики, изображенные на рис. 2, а и б, относятся к одному типу, определяемому условием $3a_3^2 > 8a_1$ (две различные точки перегиба; отличаются по количеству экстремумов (по количеству действительных различных корней многочлена $P_4'(x)$)).

График, изображенный на рис. 2,в, соответствует условию $3a_3^2 \leq 8a_2$ (отсутствует интервал выпуклости). Внутренних экстремумов может быть либо три (два минимума, один максимум), либо один (минимум).

Информацию о корнях многочлена $P_4(x)$ можно получить, и воспользовавшись заменой $X = x + \frac{a_3}{4}$. Тогда:

$$P_4(X) = X^4 + pX^2 + qX + r,$$

$$p = a_2 - \frac{3}{8}a_3^2, q = a_1 - \frac{a_1a_3}{2} + \frac{a_3^3}{8}, r = a_0 - \frac{a_1a_3}{4} + \frac{a_2a_3^2}{16} - \frac{3a_3^4}{256}.$$

При этом корни многочлена $P_4'(X) = 4X^3 + 2pX + q$ легко определить приближенно и графически как абсциссу точки пересечения кривой $y = X^3$ с прямой $y = -\frac{p}{2}X - \frac{q}{4}$. Найдя корни $P_4'(X)$ и воспользовавшись теоремами 2, 3, получим необходимую информацию о корнях многочлена $P_4(x)$.

Как показывает практика, кинетические процессы в композиционных материалах (рассматриваемых как системы) в большинстве случаев описываются моделями первого и второго порядка [1]. Однако в полидисперсных системах часто кинетические процессы набора прочности имеют не одну, а две точки перегиба. При идентификации таких систем нами использовались модели четвертого порядка в классе обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами с действительными корнями характеристического полинома, а также приведенные выше теоремы, определяющие условия действительности корней характеристического полинома. При описании экспериментально полученных кинетических закономерностей формирования основных физико-механических характеристик композиционных материалов использовалась обобщенная динамическая модель:

$$z^{(4)} + a_1z^{(3)} + a_2z^{(2)} + a_3z^{(1)} + a_4z = 0,$$

$$z = x - x_m; \quad x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0, \quad \ddot{x}(0) = \ddot{x}_0, \quad \ddot{\ddot{x}}(0) = \ddot{\ddot{x}}_0.$$

$x_0, \dot{x}_0, \ddot{x}_0, \ddot{\ddot{x}}_0$ определяются требуемым видом кинетического процесса и заданным эксплуатационным значением x_m исследуемой характеристики (*параметрическая идентификация* сводилась к определению с использованием приведенных выше теорем параметров модели или связанных с ними корней характеристического полинома). Использование известных формул Феррари при декомпозиции вызывает определенные трудности при практической реализации; приведенный подход лишен этих недостатков.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Управление качеством материалов со специальными свойствами / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Проблемы управления. – 2008. – № 6. – С. 67–74.
2. Данилов, А.М. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления / А.М. Данилов, Э.Р. Домке, И.А. Гарькина // Информационные системы и технологии. – 2012. – №2 (70). – С.5–11.
3. Красовский, А.А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А.А. Красовский, Ю.А. Вавилов, А.И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. – 479 с.

References

1. Garkina, I.A. Quality management of the materials of special properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Control Sciences, 2008. №6. – P. 67–74.
2. Danilov, A.M. Formalization of the evaluation operator characteristics of the object management / A.M. Danilov, E.R. Domke, I.A. Garkina // News OrelGTU. Information systems and technology. – 2012. – № 2 (70). – P.5–11.
3. Krasovskii, A.A. The automatic control systems of the aircraft / A.A. Krasovskii, Y.A. Vavilov, A.I. Suchkov. – M.: The air force engineering academy named N.E.Zhukovsky, 1986. – 479 p.

Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 630008, г. Новосибирск,
ул. Ленинградская, д.113,
тел.: (383) 266-41-25; факс: (383) 266-40-83

Сколубович Юрий Леонидович,
доктор технических наук, профессор, ректор
E-mail: rector@sibstrin.ru

Войтов Евгений Леонидович,
доктор технических наук, доцент
E-mail: voitovel@ya.ru

Сколубович Алексей Юрьевич,
кандидат технических наук
E-mail: skolubovicha@mail.ru

*Novosibirsk State Architectural-building
University*

Russia, 630008, Novosibirsk, 113,
Leningradkaya Titov St.,
tel.: (383) 266-41-25; fax: (383) 266-40-83

Skolubovich Yuri Leonidovich,
Doctor of Sciences, Professor, Rector
E-mail: rector@sibstrin.ru

Voitov Evgeny Leonidovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor
E-mail: voitovel@ya.ru

Skolubovich Aleksey Yur'evich,
Candidat of Sciences
E-mail: skolubovicha@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ СОРБЦИОННЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ ВОД

Ю.Л. Сколубович, Е.Л. Войтов, А.Ю. Сколубович

Рассмотрены сорбционные загрузки, используемые в технологиях подготовки питьевой воды. Представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных в природных условиях на различных источниках.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, источники водоснабжения, природная вода, технология, очистка, фильтрующий материал, антропогенные факторы, осветление, фильтрация.

SORPTION FILTER MATERIALS IN NATURAL WATER TREATMENT TECHNOLOGIES

Yu.L. Skolubovich, E.L. Voitov, A.Yu. Skolubovich

Sorption loadings used in the technology of drinking water are considered. The results of experimental studies carried out in field conditions on various sources are given.

Keywords: human influences, water sources, natural water, technology, treatment, filter material, human factors, lighting, filtration, adsorption.

Усиление антропогенного воздействия на поверхностные и подземные источники водоснабжения, в которые поступает все большее количество различных химических и органических соединений, приводит к ухудшению органолептических, токсикологических и других показателей качества воды. Традиционные схемы подготовки воды, включающие предварительное хлорирование, реагентную обработку, коагуляцию, осветление, фильтрацию, вторичное хлорирование, как правило, предназначены для кондиционирования природных вод из поверхностных источников с небольшим техногенным и антропогенным загрязнением [1]. В настоящее время эти схемы не в состоянии обеспечить потребителей доброкачественной водой, т.к. их барьерные функции в отношении фенолов, нефтепродуктов, тяжелых металлов, хлорорганических соединений недостаточны. Загрязняющие вещества поступают в источники водоснабжения в результате естественных природных процессов и антропогенной деятельности: техногенного вмешательства человека в эти процессы, а также сброса промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных отходов. В самом процессе подготовки питьевой воды необоснованное использование хлорсодержащих дезинфектантов приводит к образованию хлорфенолов и летучих галогенорганических соединений, отличающихся высокой стабильностью и токсичностью.

В Новосибирском архитектурно-строительном университете (Сибстрин) разработаны технологии подготовки питьевой воды из поверхностных и подземных источников с применением новых высокоэффективных сооружений: дегазатора-окислителя для комплексной обработки подземных вод аэрацией и окислением; реактора-осветлителя для предварительной реагентной очистки поверхностных и подземных вод; а также скорых фильтров с загрузкой из горелых пород оптимального фракционного состава. Однако и эти технологии при высоком уровне природного и антропогенного загрязнения поверхностных и подземных вод не всегда обеспечивают нормативное качество очищенной воды [2].

Для очистки воды, содержащей микроколичества химических и органических веществ, наиболее универсальным и экономически целесообразным является сорбционный метод с использованием активных углей. Преимуществами сорбционного метода являются: удаление загрязнений различного происхождения до любой остаточной концентрации, отсутствие вторичных загрязнений и возможность управления процессом. Кроме того, сорбционная ступень очистки повышает надежность работы водоочистной станции в целом и гарантирует требуемое качество воды даже в периоды аварийных ситуаций и попадания в водоисточник фенолов, нефтепродуктов и других загрязнений.

Активные угли используются в практике водоснабжения в двух видах: порошкообразные и зернистые (гранулированные или дробленые). Порошкообразный уголь (ПАУ) вводится в исходную речную воду до или после введения коагулянта. После завершения процессов сорбции загрязнений он выделяется в отстойниках вместе с гидроксидным осадком, с которым выводится на совместную обработку и утилизацию. Поскольку стоимость ПАУ высока, как и стоимость гранулированных углей (ГАУ), а используется он одноразово, применение ПАУ при высоких дозах экономически невыгодно. Кроме того, процесс приготовления угольной суспензии и ее дозирование в обрабатываемую воду – достаточно трудоемкий процесс, усложняющий эксплуатацию реагентного хозяйства. В связи с этим целесообразность применения ПАУ ограничивается случаями, когда в природной воде органические соединения появляются периодически на срок не более 2–3 месяцев в году. Применение ПАУ оправдано также в случае аварийных ситуаций разливов нефти, мазута, появления в речной воде ацетона, бензина и других загрязнений, что сопровождается неприятными привкусами и запахами.

Нами проведены исследования по углеванию высокоцветной воды водохранилища р. Чумыш на насосно-фильтровальной станции (НФС) г. Киселевска Кемеровской области в период паводка [3]. Исследования проводились на экспериментальной мобильной установке. Дозирование суспензии угля в обрабатываемую воду (в воздухоотделитель) осуществлялось с помощью перистальтического насоса. Доза угля в паводок составляла 5–10 мг/л. Одновременно в воду вводился катионный флокулянт Праестол 650 ТР с дозой до 0,5 мг/л. Углевание речной воды обеспечивало удаление привкуса, запаха, нефтепродуктов, фенолов, аммонийного азота и гуминовых кислот, обуславливающих избыточную цветность воды в отдельные сезоны года, до предельно-допустимых концентраций (ПДК). По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации, использованные при реконструкции узла углевания воды порошкообразным углем на НФС г. Киселевска.

В связи с постоянным присутствием химических веществ в водах большинства рек Сибири, сложностью и большой эксплуатационной стоимостью углевания воды порошкообразным углем технически оправдано и экономически целесообразно применение зернистых активных углей в качестве загрузки скорых фильтров.

На водопроводах Тюмени, Костромы, Нижнего Новгорода, Ижевска и других городов впервые был использован гранулированный уголь марки АГ-3, в качестве верхнего слоя в двухслойных угольно-песчаных загрузках существующих фильтров. Опыт эксплуатации активного угля в таких условиях показал, что уголь выполняет определенное время функцию сорбционной загрузки и решает задачу повышения качества воды. Однако из-за поступления на фильтры воды из отстойников или осветлителей с взвешенным осадком, содержащей мутность и частицы гидроксида алюминия, через 3–5 месяцев происходила кольматация угля и снижение его сорбционной

емкости по отношению к растворенным загрязняющим веществам. В результате возникала необходимость его выгрузки из фильтров для реактивации или полной замены [3].

В настоящее время наиболее рациональным методом применения активного угля на водоочистных станциях считается использование угля в отдельных сорбционных фильтрах, представляющих собой третью ступень очистки воды. Этот метод является наиболее надежным с санитарно-гигиенической и технологической точки зрения.

В лаборатории насосно-фильтровальной станции г. Кемерово проведены исследования по очистке воды р.Томи и выбору наиболее эффективной марки угля [2]. Экспериментальная установка состояла из 5 фильтрационных колонок высотой 1,5 м, загруженных активными углями марок АГ-3, СКТ-6А отечественного производства и марок F-300, F-400, TL-830 производства Бельгии.

Колонки работали параллельно в непрерывном режиме в течение года, очищая воду после производственного скорого фильтра. Очищаемая вода ежедневно контролировалась по мутности, цветности, окисляемости и остаточному хлору. Ежедневно определялись хлорорганические соединения (хлороформ, четыреххлористый углерод, дихлорметан, трихлорэтилен, трихлорэтан, тетрахлорэтилен), а также амины (монометиламин, триметиламин, диметиламин, диэтиламин) и фенолы. Вода после производственного фильтра характеризовалась мутностью от 0,2 до 2,3 мг/л, цветностью от 4 до 14 град., величиной остаточного хлора 0,15–0,4 мг/л. После очистки на угольных загрузках мутность составляла 0–1,5 мг/л, цветность – 0–8 град., остаточный хлор практически отсутствовал. В загрузках наблюдалось заметное снижение органических производных аммиака – аминов. Концентрация фенолов снижалась в 4–10 раз с гарантированным обеспечением ПДК (0,001 мг/л). Также снижалось содержание различных соединений фенола. Происходило существенное уменьшение содержания хлорорганических соединений, однако ресурс работы угля в этом случае составлял всего лишь несколько месяцев.

Основные показатели эффективности углей различных марок приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характерные данные по эффективности углей различных марок

№ п/п	Наименование показателей	Марка угля				
		АГ-3	СКТ-6А	F-300	F-400	TL-830
1	Активность по йоду, %	58,4	–	83,2	–	87,6
2	Йодное число	546	648	775	686	673
3	Сорбционная емкость по метиленовому голубому	125	230	245	265	230
4	Удельная адсорбция по отношению к фенолу, мг/л	0,003	0,008	0,004	0,008	0,006
5	Емкость по ХПК через 3 часа работы, мг/л	1,49	–	2,31	2,4	2,48
6	Суммарный объем пор, см /г	0,8–1,06	0,8–1,0	0,85	0,94	0,85
7	Продолжительность работы загрузки (при концентрациях фенола в исходной воде и высоте загрузки), ч	10,8	40	16	34	22

Установлено, что эффективность адсорбционной очистки поверхностных и подземных вод от органических соединений неподвижным слоем активных углей (АУ) определяется рядом факторов: величиной равновесной адсорбции, кинетикой, скоростью фильтрования, параметрами слоя загрузки, влиянием пористой структуры адсорбента и другими параметрами.

Сравнительные показатели эффективности сорбционной очистки по основным показателям качества воды на углях различных марок представлены в табл. 2.

Показатели эффективности сорбционной очистки по основным показателям качества воды на углях различных марок

Показатели качества воды	Исходная вода	АГ-3	СКТ-6А	F-400	TL-830
1	2	3	4	5	6
Мутность, мг/л	0,8	0,8	0,5	0,0	0,3
Цветность, град.	16	14	6	3	8
Окисляемость, мг O ₂ /л	2,8	2,5	1,4	1,1	1,7
Хлороформ, мкг/л	127	11,3	6,3	8,7	Следы
Тетрахлорметан, мкг/л	1,2	0,3	0,1	0,2	Следы
Бромдихлорметан, мкг/л	1,3	0,3	Следы	Следы	0,0
Хлорбромметан, мкг/л	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Анализ полученных данных по эффективности удаления различных загрязнений исследованными углями показывает, что по адсорбционной способности и параметрам, характеризующим сорбционную очистку, угли располагаются в следующей последовательности:

F-400 > СКТ-6А > TL-830 > АГ-3.

Наиболее эффективными являются угли марок F-400 и СКТ-6А, наименее эффективным – уголь АГ-3. Однако с учетом более низкой стоимости, не дефицитности и высоких прочностных характеристик для дальнейших исследований принят уголь марки АГ-3.

В водах с повышенным содержанием органических веществ железа и марганец образуют устойчивые органические соединения (комплексы), трудноудаляемые при обычной обработке хлором и коагулянтами. Применение же перманганата калия, сильного окислителя, позволяет разрушить эти комплексы с дальнейшим окислением ионов марганца (II) и железа (II) и выделить из воды продукты окисления. Поэтому в связи с высоким сезонным содержанием железа и марганца в речной воде в паводок производилось введение в обрабатываемую воду раствора перманганата калия с дозой до 5 мг/л в фильтрованную воду перед сорбционным фильтром.

В результате взаимодействия перманганата калия с активным углем на поверхности его зерен происходило образование отрицательно заряженного осадка гидроксида марганца $Mn(OH)_4$, который действовал как дополнительный сорбент, адсорбирующий положительно заряженные ионы Fe^{2+} и Mn^{2+} , и как катализатор дальнейшего окисления ионов кислородом воздуха. На водоочистой станции питьевого водоснабжения поселка Красный Брод Кемеровской области проведены исследования по очистке вод водохранилища на р. Кривой Ускат. Вода водохранилища характеризовалась повышенной жесткостью (8,5–10,1 ммоль/л) и сверхнормативным содержанием нефтепродуктов (до 1,2 мг/л), аммиака (до 5 мг/л), сульфатов (до 1,5 г/л). Схема и фото экспериментальной установки приведены на рис.1 и 2 соответственно. Сорбционный фильтр был загружен гранулированным активным углем марки АГ-3 с крупностью зерен 0,5–2,0 мм и высотой фильтрующего слоя 2,0 м. Основная очистка воды от нефтепродуктов, аммиака, сульфатов происходила в результате ее коагулирования, сорбции примесей на поверхности хлопьев образовавшегося гидроксида алюминия, осветления в реакторе-осветлителе и фильтрования на скором фильтре с загрузкой из горелых пород. Оставшаяся часть нефтепродуктов (0,2–0,3 мг/л), аммиака, сульфатов и значительная часть солей жесткости удалялись на сорбционном фильтре. Скорость фильтрования составляла 5 м/ч. При этом содержание нефтепродуктов, аммиака, сульфатов и величина жесткости снижались до ПДК. Результаты исследования эффективности сорбционной очистки воды водохранилища в различные сезоны года приведены в табл. 3.

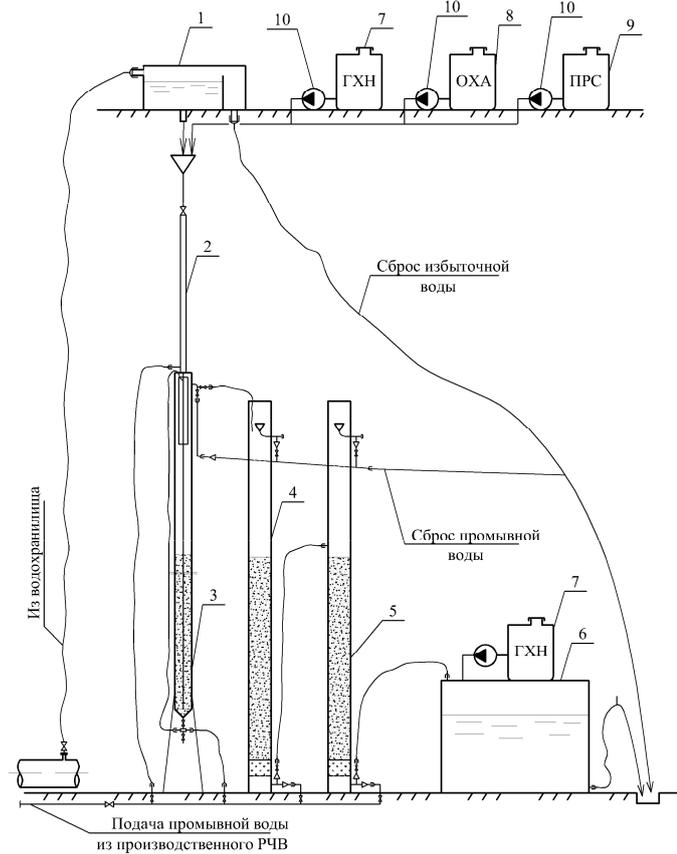


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по очистке воды водохранилища поселка Красный Брод:
 1 – бак постоянного уровня; 2 – воздухоотделитель; 3 – реактор-осветлитель; 4 – скорый фильтр;
 5 – угольный сорбционный фильтр; 6 – бак очищенной воды; 7 – баки гипохлорита натрия
 для предварительного и вторичного хлорирования воды; 8 – бак оксихлорида алюминия;
 9 – бак Праестола 650 TR; 10 – дозировочные насосы



Рис. 2. Экспериментальная полупромышленная установка по очистке воды водохранилища поселка Красный Брод

Обобщенные результаты исследований эффективности сорбционной очистки воды
водохранилища

Периоды работы установки	Этапы очистки воды	Мутность, мг/л	Цветность, мг/л	Окисляемость, мг O ₂ /л	Содержание железа, мг/л	Содержание марганца, мг/л
Февраль	Фильтрация СФ Марганцевание и сорбция на УСФ	0,1–1,5 0,0–0,6	22–41 8–16	7,2–9,1 3,4–4,7	0,6–0,7 0,1–0,2	0,4–0,5 0,0–0,1
Апрель	Фильтрация на СФ Марганцевание и сорбция на УСФ	0,6–3,2 0,3–1,5	31–47 12–19	6,0–9,1 3,3–4,5	0,6–0,7 0,2–0,3	0,3–0,4 0,0–0,1
Июль	Фильтрация на СФ Сорбция на УСФ	0,4–2,5 0,2–1,3	33–51 13–20	7,2–9,4 3,9–4,8	0,5–0,6 0,2–0,3	0,2–0,3 0,1–0,2
Октябрь	Фильтрация на СФ Сорбция на УСФ	0,2–1,7 0,0–0,8	27–45 11–18	6,9–9,1 3,5–4,6	0,2–0,4 0,1–0,2	0,0–0,1 0,0

П р и м е ч а н и е . СФ – скорый фильтр; УСФ – угольный сорбционный фильтр.

Выводы

1. Для очистки природных вод, содержащих микроколичества химических, органических и биогенных веществ, наиболее универсальным и экономически целесообразным является сорбционный метод с использованием активных углей. Определены и рекомендованы наиболее рациональные марки сорбентов для применения в технологии подготовки питьевой воды из поверхностных и подземных источников Сибири (АГ-3 и АГ-ОВ-1 соответственно).

2. В связи с постоянным присутствием химических веществ в водах большинства рек Сибири наиболее надежным в санитарно-гигиеническом отношении и технически оправданным является применение зернистых активных углей в качестве загрузки сорбционных фильтров.

Список литературы

1. Сколубович, Ю.Л. Оценка источников водоснабжения Кузбасса / Ю.Л. Сколубович [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – № 2. – С.2–5.
2. Сколубович, Ю.Л. Питьевое водоснабжение города Кемерово из подземных источников. / Ю.Л. Сколубович, Т.А. Краснова. – М.: Изд-во «Спутник+», 2001. – 97 с.
3. Войтов, Е.Л. Подготовка питьевой воды из поверхностных источников с повышенным природным и антропогенным загрязнением / Е.Л. Войтов, Ю.Л. Сколубович. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. – 216 с.

References

1. Skolubovich, Yu.L. Evaluation of water supply sources Kuzbass / Yu.L. Skolubovich, [etc.] // Water supply and sanitary engineering. – 2002. – № 2. – С.2–5.
2. Skolubovich, Yu.L. Drinking water kind of Kemerovo from underground sources / Yu.L. Skolubovich, T.A. Krasnov. – M.: Publishing House of the «Sputnik +», 2001. – 97 p.
3. Voitov, E.L. Drinking water from surface sources with high natural and anthropogenic

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»

Полубояринов Павел Аркадьевич,
кандидат сельскохозяйственных наук,
Доцент кафедры «Физика и химия»

Давыдов Геннадий Павлович,
аспирант кафедры «Физика и химия»

Князев Владимир Александрович,
аспирант 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»

Poluboyarinov Pavel Arkadyevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Physics and chemistry»

Davydov Gennady Pavlovich,
Postgraduate of the department «Physics
and Chemistry»

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,
Postgraduate of the department «Water
supply, sewerage and hydraulic Engineering»

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, П.А. Полубояринов, Г.П. Давыдов, В.А. Князев

Приведены результаты промышленного внедрения новой технологии реагентной очистки сточных вод птицефабрики, предусматривающей сочетание методов концентрированного и фракционного коагулирования. Показано, что предложенная технология существенно повышает эффект очистки сточных вод в процессе их отстаивания.

Ключевые слова: сточные воды, реагентная очистка, коагуляция, флокуляция, отстаивание, естественная биологическая очистка.

NEW TECHNOLOGY OF PRELIMINARY PHISICO-CHEMICAL WASTE WATER PURIFICATION

S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, P.A. Poluboyarinov, G.P. Davydov, V.A. Knyazev

The results of industrial introduction of new technology of poultry plant waste water purification, including concentrate and fractionel coagulation methods are given. Suggested technology allows to rise essentially waste water purification effect by settling.

Keywords: waste water, reagent purification, coagulation, flocculation, settling, natural biological purification.

Наибольшее распространение в процессах очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности получили биологические методы. Одним из эффективных методов биологической очистки и обеззараживания производственных сточных вод является их обработка в обычных проточных прудах. Биологические пруды представляют собой искусственно созданные водоемы для биологической очистки сточных

вод, основанной на процессах, которые происходят в водоемах при самоочищении. Биологические пруды обеспечивают более высокий эффект бактерицидного самоочищения, чем сооружения искусственной биологической очистки. Так, число кишечных палочек после очистки в прудах снижается на 99,9 % от начального содержания. Содержание яиц гельминтов в воде, прошедшей биологические пруды, ничтожно мало. К достоинствам прудов относят сравнительно низкие строительные и эксплуатационные затраты, высокий уровень очистки сточных вод, значительную буферную способность при залповых сбросах сточных вод, высокую степень обеззараживания сточных вод и изъятия из них биогенных элементов.

Впервые в мире очистные пруды были предложены русским профессором С.Н. Строгановым. К настоящему времени накоплен значительный положительный опыт по эксплуатации этих сооружений. Они получили широкое распространение в практике очистки сточных вод в США, Канаде, Австралии, Швеции и в других странах. Пруды сооружаются с различной степенью проточности со сроками нахождения в них сточных вод от 5 до 60 суток.

Наряду с достоинствами биологические пруды имеют и существенные недостатки. Они занимают большую территорию, поскольку гидравлическая нагрузка на эти сооружения составляет порядка 30–250 м³/га·сут. Кроме того, биологические пруды являются очистными сооружениями сезонного типа и в холодный период года полностью выключаются из работы. Нормальная эксплуатация прудов может происходить лишь при температуре воды выше 15 °С. При понижении температуры ниже 6 °С и особенно после образования ледяного покрова, когда проникновения кислорода в воду не происходит, процесс окисления органических веществ полностью прекращается. В этот период может происходить лишь намораживание сточной воды.

Научно-исследовательским институтом по сельскохозяйственному использованию сточных вод «Прогресс» (г. Москва) был разработан новый технологический режим прудовых систем и биопруды специальной конструкции, позволяющие устранить основные недостатки, присущие технологии естественной биологической очистки. Биопруды новой конструкции в настоящее время известны под названием БОКС-пруды (биологические, оксидационные, контактные, стабилизационные). Строительство БОКС-прудов требует сравнительно невысоких затрат, а эксплуатация их отличается простотой, надежностью и не требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Эффективная очистка сточных вод достигается за счет использования следующей последовательности технологических процессов: аккумулярование в прудах-накопителях; очистка в водорослевых прудах; доочистка в рачковых прудах; глубокая доочистка в биоинженерных сооружениях с высшей водной растительностью (рогоз, тростник).

Аккумулярование сточных вод в накопительных прудах (депонентных биоокислителях) производится в периоды, когда по температурным условиям возможно снижение эффективности работы БОКС-прудов. В теплое время года накопленные в депонентах – окислителях сточные воды выпускаются на БОКС-пруды. В накопительные пруды сточные воды подаются после сооружений механической очистки. Потребный объем депонентов-биоокислителей определяется продолжительностью холодного периода для данной климатической зоны согласно климатическим картам либо многолетним температурным данным. Основные процессы очистки сточных вод осуществляются в теплый период года в водорослевых прудах. Процессы самоочищения сточных вод в водорослевых оксидационных прудах протекают под действием биологических агентов: водорослей; простейших, бактерий и бактериофагов.

Основная технологическая функция водорослей заключается в выделении ими в процессе фотосинтеза большого количества кислорода (до 25 гр/м²·сут). Выделяемый кислород используется аэробными микроорганизмами для окисления органических загрязнений сточных вод. Кроме того, водоросли выделяют в сточную воду различные антибиотические вещества типа фитанцидов, обладающие сильным бактерицидным и бактериостатическим действием.

Основная технологическая функция простейших в водорослевых оксидационных прудах заключается в их фагоцитарной деятельности (в поглощении бактерий, являющихся источником их питания).

В прудах присутствуют все типы бактерий: прототрофы; метатрофы и паротрофы, влияние которых на процессы самоочищения сточных вод чрезвычайно велико. В числе прототрофов имеются микробы, окисляющие аммонийные соли в нитраты и нитриты.

В 2006 году в соответствии с рекомендациями НИИ ССВ «Прогресс» институтом «Пензагропроект» была разработана проектная документация на строительство сооружений естественной биологической очистки сточных вод ОАО Птицефабрика «Васильевская» Пензенской области производительностью 1300 м³/сут.

В 2008 году очистные сооружения были запущены в эксплуатацию. За время эксплуатации БОКС-пруды показали высокую эффективность и обеспечили качество очистки сточных вод, позволяющее без проблем сбрасывать их в водоем рыбохозяйственного назначения первой категории.

В 2012 году на территории ОАО Птицефабрика «Васильевская» был введен в строй цех убоя птицы, в связи с чем расход сточных вод, обрабатываемых на сооружениях естественной биологической очистки, увеличился до 3500 м³/сут и существенно повысились концентрации содержащихся загрязняющих веществ. Концентрация органических загрязнений (ХПК) в сточных водах, отводимых с территории птицефабрики, колебалась в пределах 3000–10000 мг/л; азота аммонийного – 50–280 мг/л; фосфатов – 15–25 мг/л.

Увеличение расхода сточных вод было скомпенсировано вводом в эксплуатацию двух новых очередей прудовых систем естественной биологической очистки.

Опыт эксплуатации сооружений естественной биологической очистки сточных вод ОАО ПФ «Васильевская» выявил ряд негативных моментов. В результате естественной альголизации в водорослевых прудах интенсивно развивались сине-зеленые водоросли преимущественно *Microcystis aeruginosa*. Сине-зеленые водоросли в процессе своей жизнедеятельности выделяют альготоксины, вследствие чего дальнейшая очистка сточных вод в рачковых прудах проходила неудовлетворительно. Сточные воды на выходе с биоплато имели повышенную цветность, в них присутствовали в значительных концентрациях не утилизированные в рачковых прудах токсичные формы фитопланктона. Биомасса сине-зеленых водорослей, ежедневно сбрасываемых в водоем, измерялась тоннами, что обуславливало риски возникновения эффекта его «цветения». Альготоксины являются консервативными химическими соединениями, долгое время сохраняющимися в воде. Они способны преодолевать барьерную функцию современных водопроводных очистных сооружений и попадать в системы питьевого водоснабжения. Альготоксины обладают мощным канцерогенным действием и являются сильными иммунодепрессантами.

В 2011–2012 гг. сотрудниками Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (ПГУАС) и НИИ «Альгобиотехнология» (г. Пенза) проводились исследования технологии биологической реабилитации экосистемы водорослевых прудов за счет их искусственной альголизации штаммом *Chlorella vulgaris* BIN. Данный штамм легко культивируется и хорошо адаптируется к условиям водорослевых биопрудов, так как является планктонным. Штамм *Chlorella vulgaris* BIN интенсивно развивается на промышленных, сельскохозяйственных и бытовых сточных водах, при этом он способен полностью выдавливать из водных биоценозов ранее присутствовавшие там сине-зеленые водоросли.

Штамм проявляет ярко выраженные антагонистические свойства к альгофлоре, бактериям и грибам. Штамм строго соблюдает условие монокультуры и обладает невосприимчивостью к фагам. В процессе культивирования штамма на сточных водах наблюдается эффект полного их обеззараживания. Результаты искусственной альголизации водорослевых прудов третьей очереди очистных сооружений показали, что хлорелла активно развивается в виде монокультуры. Достаточно ее заселить один раз в начале вегетативного сезона, и сине-зеленые водоросли в пробах на выходе из водо-

рослевых прудов исчезали. Вся полученная биомасса хлореллы полностью утилизировалась в рачковых прудах. С целью предотвращения преждевременного поедания биомассы хлореллы зоопланктоном в водорослевых прудах они были переведены из режима проточного реактора-вытеснителя в режим реактора периодического действия (циклотенка).

В соответствии с рекомендациями разработчиков технологии естественной биологической очистки, реализованной на канализационных сооружениях птицефабрики, общая концентрация органических загрязнений в сточных водах, поступающих в накопительные пруды, не должна превышать 1000 мг/л.

Данное условие могло быть обеспечено только в случае интенсификации процесса механической очистки сточных вод в прудах-отстойниках за счет их предварительной коагуляционной обработки.

Сотрудниками кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства была разработана новая технология коагуляционной обработки сточных вод птицефабрики, позволяющая обеспечивать требуемые условия их биологической очистки.

В 2011 г. были проведены лабораторные и производственные испытания предложенной технологии, показавшие ее высокую эффективность [1].

На основании данных, полученных при проведении лабораторных исследований, и результатов полупромышленных испытаний технологии реагентной очистки сточных вод ОАО ПФ «Васильевская» была разработана следующая технологическая схема (рис. 1).

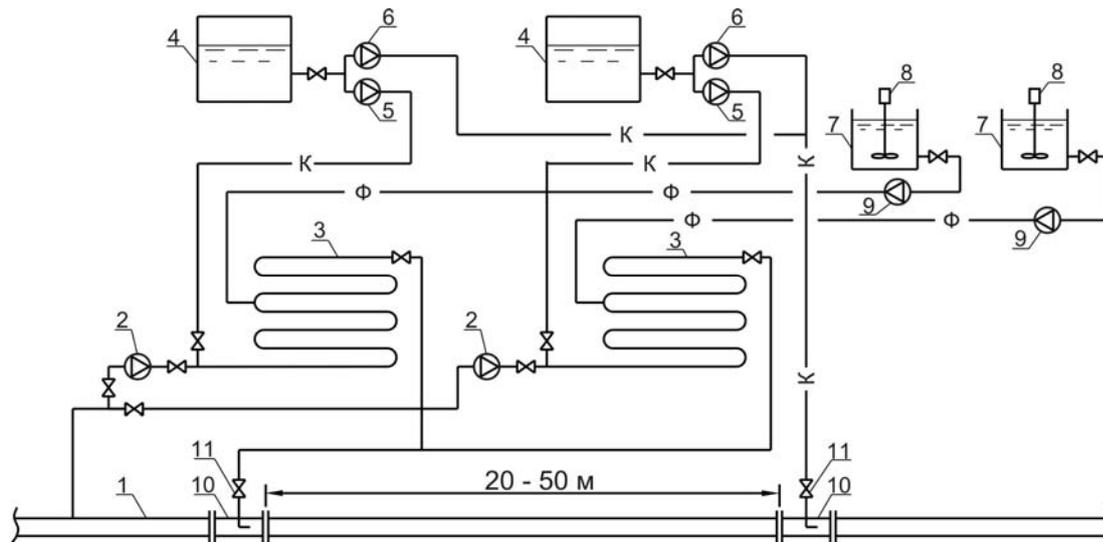


Рис. 1. Технологическая схема процесса реагентной обработки сточных вод ОАО ПФ «Васильевская»:

- 1 – напорный канализационный коллектор; 2 – насос для перекачки рециркуляционного потока сточных вод; 3 – трубчатый смеситель-флокулятор; 4 – расходный бак коагулянта (сернистого алюминия); 5 – насос-дозатор, подающий коагулянт в трубчатый флокулятор; 6 – насос-дозатор, подающий коагулянт в напорный канализационный коллектор; 7 – растворно-расходный бак флокулянта (катионный сополимер полиакриламида К-280); 8 – механическая мешалка; 9 – насос-дозатор флокулянта; 10 – смесительный узел; 11 – запорная арматура

Часть расхода сточных вод (6 %) из напорного канализационного коллектора 1 подается во всасывающие патрубки насосов 2 для перекачки рециркуляционного потока.

Из насосов 2 сточные воды под избыточным напором подаются в трубчатый смеситель-флокулятор 3. Трубчатый смеситель-флокулятор является закрытым прямо-

точным реактором, представляющим собой линейное секционное устройство, выполненное из труб расчетной длины и диаметра, предназначенное для интенсивного перемешивания сточных вод с реагентами в процессе турбулизации потока сточных вод, обеспечивающей интенсивное гидродинамическое воздействие на дисперсную фазу. В трубчатом смесителе-флокуляторе энергия для перемешивания сточных вод выделяется в процессе турбулизации потока на линейных участках и при поворотах потока. Коагулянт подается в сточные воды на входе в трубчатый смеситель-флокулятор 3 из расходного бака коагулянта 4 насосом-дозатором 5. Перемешивание сточных вод с коагулянтом происходит в первой смесительной секции смесителя-флокулятора. После завершения процесса коагулирования дисперсных загрязнений сточных вод во вторую смесительную секцию смесителя-флокулятора из растворного расходного бака флокулянта 7 насосом-дозатором 9 подается флокулянт.

При обработке части потока сточных вод (около 6 % от общего расхода) в трубчатом смесителе-флокуляторе используется технологический прием концентрированного коагулирования, заключающийся в дозировании всего потребного количества коагулянта лишь в небольшой объем обрабатываемых сточных вод. После тщательного смешения с раствором коагулянта поток обрабатываемых сточных вод объединяют с основным потоком.

Метод концентрированного коагулирования имеет следующие преимущества:

- 1) распределение всего объема коагулянта только в части объема сточных вод, что создает условия для ускорения хлопьеобразования;
- 2) после смешения с необработанными сточными водами микрохлопья, сформированные в условиях повышенной концентрации коагулянта, обладают высокой активностью и хорошо сорбируют содержащиеся в основном потоке сточных вод загрязнения.

Смешение рециркуляционного потока сточных вод, обработанных в трубчатых смесителях-флокуляторах 3, с основным потоком сточных вод осуществляется в смесительном узле 10. Сформированные в рециркуляционном потоке микрохлопья, стабилизированные флокулянтом, выступают в роли центров последующего хлопьеобразования. В соответствии с автокаталитической теорией для полидисперсных систем частицы различной величины агрегируются скорее, чем частицы одинаковых размеров. Особенно это справедливо, если частицы золь по размерам отличаются друг от друга на порядок, что имеет место при использовании в качестве высокоактивных гетерогенных коагулирующих структур предварительно сформированных микрохлопьев, стабилизированных флокуляционной обработкой. Размеры микродисперсных частиц в необработанных сточных водах находятся в пределах 0,002–0,05 мкм, тогда как размеры микрохлопьев достигают уровня 0,1–5 мкм. Коагуляция микрохлопьев, поверхность которых покрыта слоем флокулянта, имеющего высокую плотность электрического заряда, и их взаимодействие с коллоидными загрязнениями происходит в потоке сточных вод в результате интенсивного перемешивания (градиентная коагуляция).

На расстоянии 50 м от первого смесительного узла устанавливается второй смесительный узел 10, в который из расходного бака коагулянта 4 насосом-дозатором 6 подается раствор сульфата алюминия. Последовательное введение в напорный канализационный коллектор 1 рециркуляционного потока сточных вод, прошедших реагентную обработку в трубчатом смесителе-флокуляторе 3, содержащих хорошо сформированные, устойчивые гетерогенные коагулирующие комплексы, выступающие в роли центров последующего хлопьеобразования, и раствора коагулянта (сульфата алюминия) является разновидностью технологического приема фракционного коагулирования. Фракционное коагулирование (иногда этот способ называют «дробным» или «частичным») предусматривает добавление расчетного количества коагулянта к сточным водам не одной, а двумя или несколькими последовательными порциями. Технологический эффект, достигаемый при фракционировании дозы коагулянта, почти всегда объясняется с кинетической точки зрения образованием в результате гидролиза первых порций коагулянта твердой фазы, выступающих в роли центров

хлопьеобразования при гидролизе последующих порций коагулянта. В виду того, что скорость налипания мелких частиц на крупные может в несколько раз превышать скорость взаимной коагуляции мелких частиц, прием фракционирования позволяет существенно интенсифицировать процесс коагуляционной обработки сточных вод. Большое значение также имеет и «омоложение» взвеси, полученной в результате гидролиза предшествующих порций коагулянта, т.е. процесс обновления ее активности в отношении поверхностных явлений – сорбции и адгезии.

На рис. 2 представлен общий вид трубчатого смесителя-флокулятора, установленного в здании реагентного хозяйства.

На рис. 3 представлен общий вид расходных баков коагулянта и флокулянта.



Рис. 2. Общий вид смесителя-флокулятора



Рис. 3. Общий вид расходных баков коагулянта

С целью оптимизации эксплуатационных затрат на процесс предварительной коагуляционной обработки наряду с сульфатом алюминия также были испытаны и другие реагенты (оксихлорид алюминия и сульфат железа III «Ферикс – 3»).

Доза флокулянта (катионного сополимера полиакриламида К-260) по товарному продукту в пересчете на весь расход сточных вод составляет 4 мг/л.

Как соли алюминия, так и сульфат железа III позволили сформировать на входе в пруд-отстойник хорошо оседающие скоагулированные загрязнения.

Полученные результаты представлены в таблице.

Данные производственных испытаний технологии предварительной коагуляционной обработки сточных вод ОАО ПФ «Васильевская», проведенных с 21.05.2012 г. по 12.10.2012 г.

Наименование реагента	Доза по товарному продукту, кг/м ³	Доза по оксиду металла, мг/л	Суточный расход реагента, т/сут	Цена реагента, тыс.руб./т	Затраты на реагенты, тыс.руб./сут	Концентрация загрязнений (ХПК) на выходе из отстойников, мг/л
Сульфат алюминия 7 %	0,80	56	2,80	6,20	17,36	760
Оксихлорид алюминия 10 %	0,54	54	1,89	7,70	14,55	540
Сульфат железа III 10 %	0,55	55	1,93	8,40	16,21	610

Производственные испытания показали, что:

– Технология предварительной коагуляционной обработки позволяет достичь требуемого качества сточных вод на выходе из прудов-отстойников (ХПК < 1000 мг/л).

– Предварительная коагуляционная обработка сточных вод птицефабрики обеспечивает уровень полной биологической очистки на каскаде прудовых систем, позволяющий без проблем сбрасывать их в водоем рыбохозяйственного пользования первой категории.

– Наиболее экономичным является коагулянт оксихлорид алюминия производства Казанского завода химреагентов.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Опыт внедрения технологии предварительной коагуляционной обработки сточных вод птицефабрики / С.Ю. Андреев [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №2.
2. Гетманцев, С.В. Очистка промышленных сточных вод коагулянтами и флокулянтами / С.В. Гетманцев, И.А. Нечаев. – М.: АСВ, 2008.
3. Андреев, С.Ю. Совершенствование механической и биологической очистки городских сточных вод с использованием гидродинамических устройств / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин. – Пенза: ПГУАС, 2009.

References

1. Andreev, S.Yu. Inculcation experience of technology preliminary coagulation treatment of poultry plant waste water / S.Yu. Andreev [and other] // Regional architecture and engineering. – 2011. – №2.
2. Getmantzev, S.V. Industrial waste water purification by coagulation and flocculation / S.V. Getmantzev, I.A. Nechaev. – M.: ACIHIL, 2008.
3. Andreev, S.Yu. Perfection of town water mechanical and biological purification with use of hydrodinamical apparatus / S.Yu. Andreev, B.M. Grichin. – Penza: PSUAC, 2009.

УДК 697.7

Кубанский государственный
технологический университет

Россия, 350072, г. Краснодар,
ул. Московская, д.2,
тел.: 8 (861) 255-20-88

Иванченко Владимир Тихонович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Архитектура гражданских
и промышленных зданий и сооружений»

Петриченко Артём Николаевич,
аспирант кафедры «Архитектура
гражданских и промышленных зданий
и сооружений»

E-mail: artem_ECD@mail.ru

Kuban State University of Technology

Russia, 350072, Krasnodar, 2,
Moscovskaya St.
tel.: 8 (861) 255-20-88

Ivanchenko Vladimir Tikhonovich,
Candidate of Sciences, Professor of the
department «Architecture of civil and
industrial buildings and constructions»

Petrichenko Artem Nikolayevich,
Postgraduate of the department «Architecture
of civil and industrial buildings and
constructions»

E-mail: artem_ECD@mail.ru

СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ЗДАНИЙ УСАДЕБНОГО ТИПА

В.Т. Иванченко, А.Н. Петриченко

Рассмотрены и классифицированы методы энергоснабжения автономных энергоэффективных зданий усадебного типа. Приведены способы повышения энергоэффективности в сфере жилищного строительства. Представлен метод подбора ветрогенератора и солнечных (фотоэлектрических) батарей комбинированной системы с учетом особенностей климата (распределения солнечной радиации и скоростей ветра в течение года).

Ключевые слова: автономное энергоэффективное здание, возобновляемые источники энергоснабжения, солнечная энергетика, фотоэлектрический модуль, ветрогенератор.

ENERGY SUPPLY SYSTEMS OF AUTONOMOUS ENERGYEFFICIENT FARMHOUSE

V.T. Ivanchenko, A.N. Petrichenko

The methods of energy supply of farmhouses have been considered and classified. Using of hybrid wind-photovoltaic power system for autonomous power supply of the farmstead type buildings has been analyzed. Method of selection of wind turbine and solar (photovoltaic) batteries depending on climate (distribution of solar radiation and wind speed during a year) has been developed.

Keywords: autonomous energyefficient buildings, renewable energy, solar energy, photovoltaic module, wind turbine.

На заселенной части нашей страны ещё в советское время были построены централизованные системы как тепло-, так и электроснабжения, что, безусловно, способствовало повышению уровня жизни и освоению земель. В данный момент расширение территорий, используемых под сельское хозяйство, туристическую и рекреационную деятельность, требует создания новой инфраструктуры и строительства новых жилых, бытовых и общественных зданий. Энергоснабжение новых территорий и зданий можно решить двумя основными способами: централизованно и децентрализованно (рис.1). Если подключаемый объект – это новый небольшой населенный пункт, то, несомненно, наиболее рационально использовать централизованное энергоснабжение. Но, к примеру, на территории юга России, при содействии краевой администрации, стали появляться автономные экопоселения, представляющие собой небольшие усадебные частные хозяйства. Средняя площадь отдельного участка таких поселений достигает десятков гектар, жилые здания располагаются друг от друга на расстоянии от 200 до 2000 метров. Централизованное энергоснабжение таких территорий нерационально, а сжигание горючих полезных ископаемых для получения необходимой

тепловой и электрической энергии ограничено, так как часть данных территорий находится в природоохранных зонах.

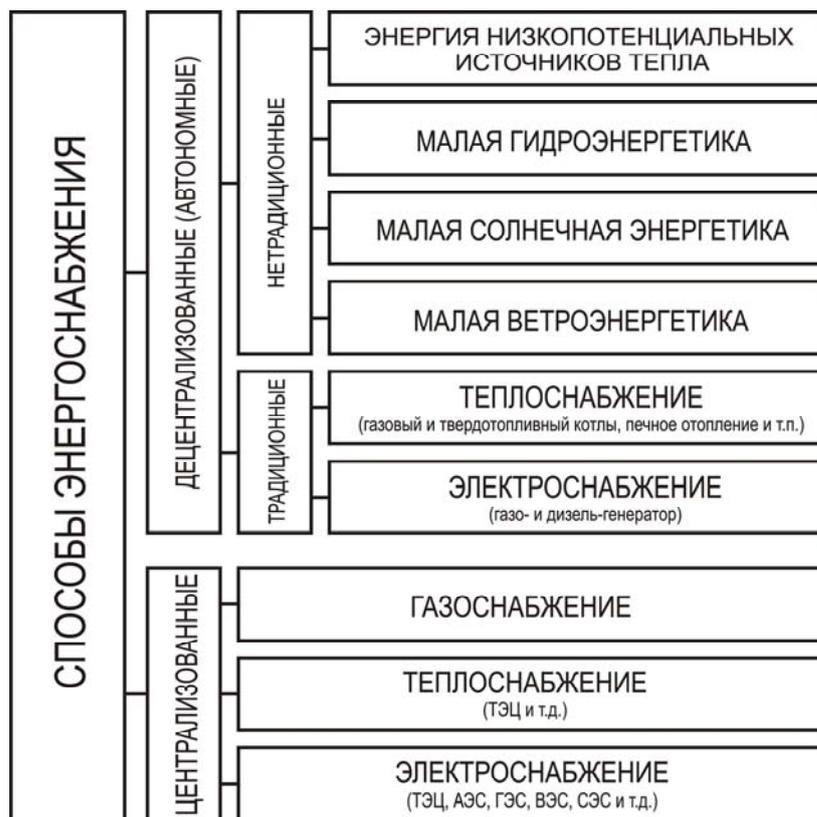


Рис. 1. Способы энергоснабжения усадебных зданий

В условиях автономии при значительном удалении от источников централизованного энергоснабжения (ТЭЦ, ГЭС, АЭС и т.п.) наиболее рационально использование нетрадиционных возобновляемых источников: фотоэлектрических «солнечных» батарей, гелиоколлекторов, ветрогенераторов и т.д. [1]. Кроме того, стоимость прокладки электросетей в эти районы и вред, наносимый природе от сжигания твердого и жидкого топлива, несопоставим со стоимостью устройства комбинированных нетрадиционных систем энергоснабжения.

При рассмотрении возможностей альтернативной солнечной энергетики нельзя забывать о её главном недостатке: значительном снижении КПД при пасмурной погоде и осадках и, кроме того, снижении уровня солнечной радиации в холодный период года. В результате возможны перебои в электро- и теплоснабжении. Решением этой проблемы является использование аккумуляторов и резервных автономных источников электроэнергии (бензиновых и дизельных электрогенераторов), однако их применение имеет ряд минусов. Во-первых, повышается себестоимость энергии. Во-вторых, генераторы, работающие на сжигании углеводородов, экологически небезопасны, что противоречит общемировой концепции современного энергоэффективного частного жилого дома, безопасного как для жильцов, так и для окружающей среды.

Проблема перебоя питания при применении солнечных систем энергоснабжения также может быть решена за счет параллельного использования другого альтернативного источника, например ветра. Для снижения капитальных затрат на устройство автономных комбинированных систем энергоснабжения необходимо подбирать оборудование на основе анализа природно-климатических условий, влияющих на работу составляющих системы.

Количество энергии H_{ϕ} , Втч/сутки, которую вырабатывает система солнечных батарей в течение суток, определяется формулой [1]:

$$H_{\phi} = E \cdot K_{\phi} \cdot F_{\phi}, \quad (1)$$

где E – среднемесячная суммарная инсоляция на горизонтальную поверхность, Втч/(м²сутки); K_{ϕ} – коэффициент, учитывающий потери при преобразовании солнечной энергии в электрическую и передаче её потребителю, %; F_{ϕ} – площадь фотоэлектрических модулей, м².

Вместо с тем количество энергии H_B , Втч/сутки, выработанное ветрогенератором в течение суток, определяется формулой [1]:

$$H_B = T \cdot K_B \cdot \bar{P}_B, \quad (2)$$

где T – время работы ветрогенератора в течение суток, ч/сутки; K_B – коэффициент, учитывающий потери при преобразовании энергии ветра в электрическую и передаче её потребителю, %; \bar{P}_B – средняя мощность на валу ветрогенератора, Вт, определяемая по формуле [1]:

$$\bar{P}_B = \xi \cdot F_B \cdot \left(\frac{3}{\pi} \cdot \rho \cdot V^3 \right), \quad (3)$$

где ξ – КПД преобразования энергии ветра ветрогенератором в полезную, %, зависит от модели ветрогенератора и его аэродинамических свойств (изменяется в пределах от 25 % до 60 %); V – скорость ветрового потока на уровне ступицы, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; F_B – площадь ометаемой лопастями ветрогенератора поверхности, м².

С учетом формулы (3) преобразуем формулу (2):

$$H_B = A_B \cdot F_B \cdot V^3, \quad (4)$$

где A_B – введенный нами параметр, характеризующий условия работы ветрогенератора и эффективность преобразования и передачи энергии ветра к потребителю, кгч/м³:

$$A_B = T \cdot K_B \cdot \xi \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \rho, \quad (5)$$

Анализируя формулы (1) и (4) и учитывая, что для большей части климатических зон России распределение скоростей ветра и солнечной инсоляции имеет общий вид, представленный на рис. 2, можно сделать вывод о возможности комбинирования ветряной и солнечной энергетических установок, что позволит создать более стабильную систему для энергоснабжения загородного дома. (На рис. 2 представлена гистограмма для условий города Краснодара (ок. 45°с.ш. и 39°в.д.) за последние 10 лет [2].)



Рис. 2. Распределение среднемесячных скоростей ветра и суммарной солнечной радиации в условиях города Краснодара

Количество энергии, потребляемое различными инженерными системами усадебного дома в течение суток H , Втч/сутки, определяется по мощности оборудования, времени и совместности работы [1, 3].

Мы предлагаем определять требования к гибридной энергетической системе по следующей формуле:

$$\{H \leq H_{\Gamma} = H_{\text{В}} + H_{\text{Ф}}\}. \quad (6)$$

Изменения среднемесячных скоростей и суммарной солнечной радиации в течение года близки к синусоидальной форме (см. рис. 2), причем пик солнечного графика приходится на лето, а спад – на зимний период. При учете скоростей ветра ситуация обратна. В результате может возникнуть ряд критических ситуаций, при которых количество энергии, вырабатываемой комбинированной системой, ниже требуемого уровня, т.е. не выполняется условие (6):

I. Работа системы в условиях минимальной солнечной радиации E_{\min} ;

II. Работа системы в условиях минимальной скорости ветра V_{\min} ;

III. Работа системы в условиях межсезонья E_i и V_i .

Предлагаем подбор комбинированной системы по следующей методике, состоящей из четырех этапов.

Этап I. Поиск параметра «гибридности» G .

Параметр гибридности G определяем из условия, что сумма отклонений выработки системы от требуемого значения в каждом расчетном периоде равна нулю, т.е.:

$$\sum_{i=1}^n (H_i + \bar{H}_i) = 0, \quad (7)$$

где H_i – расчетное количество энергии, вырабатываемое системой в i -й расчетный период (6), Втч/сутки, равно:

$$H_i = H_{\text{В}} + H_{\text{Ф}} = A_{\text{В}} \cdot F_{\text{В}} \cdot V_i^3 + E_i \cdot K_{\text{Ф}} \cdot F_{\text{Ф}}; \quad (8)$$

\bar{H}_i – среднеарифметическое значение количества энергии, вырабатываемое системой в i -й расчетный период (6), Втч/сутки, равно:

$$\bar{H}_i = \frac{\sum H_i}{n} = \frac{[A_{\text{В}} \cdot F_{\text{В}} \cdot \sum (V_i^3) + K_{\text{Ф}} \cdot F_{\text{Ф}} \cdot \sum (E_i)]}{n}. \quad (9)$$

Подставляя в выражение (7) формулы (8) и (9), преобразуем его и приведем к виду:

$$\frac{F_{\text{Ф}}}{F_{\text{В}}} = \frac{A_{\text{В}} \cdot |V_i^3 - \bar{V}^3|}{K_{\text{Ф}} \cdot |E_i - \bar{E}|} = G, \quad (10)$$

где \bar{V}^3 и \bar{E} – среднеарифметические значения солнечной радиации и куба скорости ветра по расчетным периодам в течение года.

Как видно из выражения (10), параметр гибридности G зависит от условий среды и эффективности оборудования и выражает отношение площади поверхности, занимаемой солнечными батареями, к площади, ометаемой лопастями ветрогенератора.

Этап II. Определение необходимых площадей.

Используя выражение (8) и зависимость (10), определяем площадь, ометаемую лопастями ветрогенератора, по средним арифметическим значениям скорости ветра и солнечной радиации:

$$F_{\text{В}} = \frac{H}{K_{\text{Ф}} \cdot G \cdot E + A_{\text{В}} \cdot V^3}. \quad (11)$$

Затем, также из зависимости (10), определяем требуемую площадь фотоэлектрических модулей:

$$F_{\Phi} = G \cdot F_{B}. \quad (12)$$

Этап III. Корректировка.

По результатам первых двух этапов были рассчитаны оптимальные площади как ометаемой поверхности лопастями ветрогенератора, так и фотоэлектрических модулей, но без внимания остались расчетные периоды, в течение которых система не вырабатывает необходимое количество энергии H , что недопустимо. На третьем этапе необходимо скорректировать параметры системы по расчетному периоду с наименьшими (в комплексе) условиями.

Для решения данной задачи необходимо рассчитать выработку энергии для каждого расчетного периода, принимая параметры системы, рассчитанные на этапах I и II с использованием формулы (8). Наименьшее из значений H_i определяет расчетный период с наименьшими комплексными условиями для работы комбинированной системы энергоснабжения. Необходимо скорректировать размеры системы, пересчитав их по формуле (12) и (9), подставляя условия наихудшего периода.

Этап IV. Подбор оборудования.

По рассчитанной площади ометаемой лопастями ветрогенератора поверхности определяем с помощью формулы (3) требуемую мощность при расчетной скорости. Затем по мощности подбираем конкретную модель ветрогенератора.

Модель фотоэлектрического модуля подбираем с помощью известной для конкретной модели зависимости выработки мощности при солнечной радиации 1000 Вт/м^2 от площади модуля.

Подбор осуществляется с запасом.

Для наглядности приведем пример для усадебного здания, расположенного в предгорье Краснодарского края (рис. 3).

Ограждающие конструкции выполнены в соответствии с требованиями энергоэффективности СНКК 23-302-2000 (ТСН 23-319-2000). Также были рассчитаны теплопотери здания при наружной температуре -19°C (температура воздуха в наиболее холодную пятидневку), которые составили $3,4 \text{ кВт}$. При электрическом отоплении наиболее экономичными являются инверторные сплит-системы ($\text{COP} = 3.5$). В результате получаем, что на отопление здания в критических условиях будет расходоваться $24 \cdot (3,4/3,5) = 23,3 \text{ кВтч/сутки}$ электрической энергии. Потребность в электроснабжении осветительных и бытовых приборов рассчитывается в зависимости от их мощности, часов работы в сутки и совместности работы. Для рассматриваемого здания потребность в электроснабжении составляет 18 кВтч/сутки . Таким образом, количество энергии, потребляемое различными инженерными системами усадебного дома в течение суток H равно 41300 Втч/сутки .

Технические параметры фотоэлектрических модулей KV-185: $K_{\Phi} = 14 \%$.

Технические параметры ветрогенератора Nheowind 3D 100:

- коэффициент передачи электроэнергии $K_B = 0.5$;
- коэффициент преобразования энергии ветра в полезную $\xi = 50 \%$;
- время работы $T = 24 \text{ ч}$.

Среднемесячная скорость и суммарная солнечная радиация представлены на гистограмме (см. рис. 2).

Дальнейший расчет системы энергоснабжения осуществляется в соответствии с описанными выше этапами, в результате чего получаем, что система энергоснабжения рассматриваемого усадебного здания должна включать в себя:

- 1) 26 «солнечных батарей» KV-185 общей площадью 33 кв.м ;
- 2) 4 ветрогенератора Nheowind 3D 100;
- 3) силовое оборудование соответствующей мощности;
- 4) аккумуляторные батареи с емкостью, гарантирующей работу систем на минимальном уровне потребления в течение пяти суток;
- 5) дизель-генератор (в качестве резервного источника).

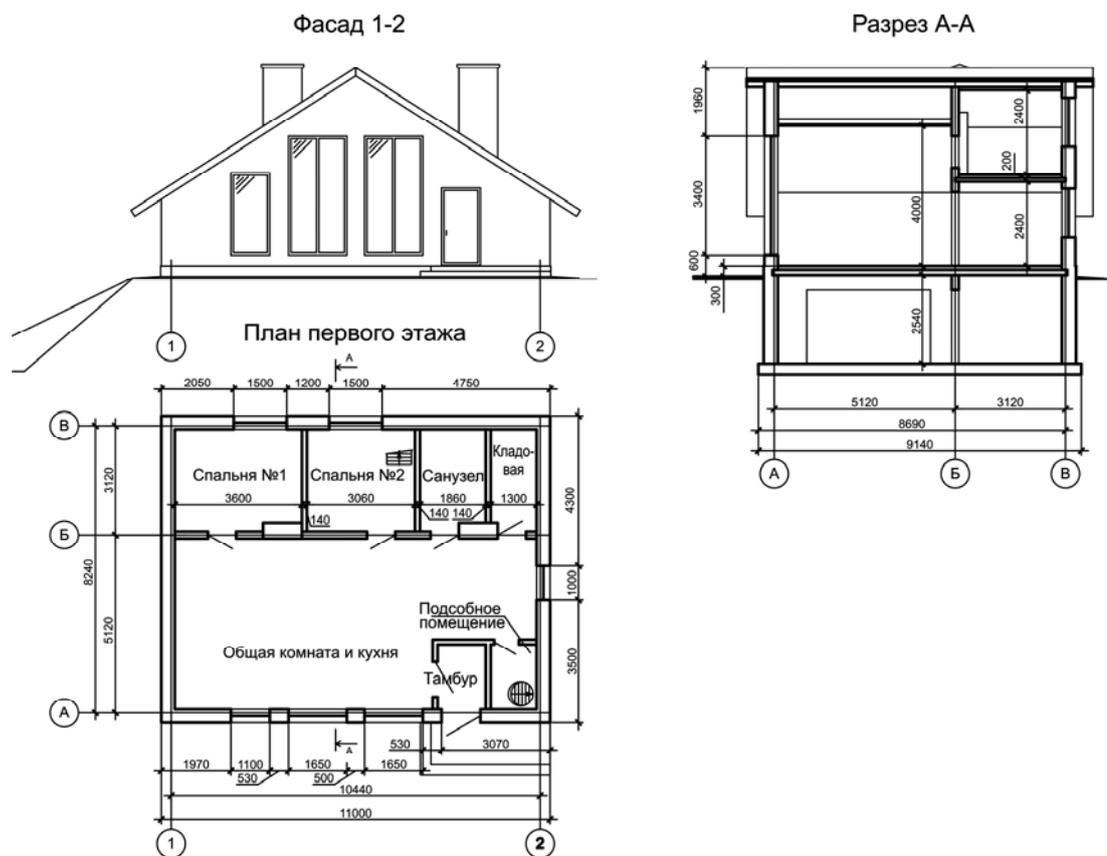


Рис. 3. Усадебный дом в Краснодарском крае (объемно-планировочное решение)

Мощность системы и, как следствие, капитальные затраты на её устройство напрямую зависят от энергопотребления усадебного здания. Энергоэффективность усадебного здания является фактором, определяющим рациональность и окупаемость автономной комбинированной системы энергоснабжения. К примеру, снижение термического сопротивления наружных стен и покрытия в полтора раза в рассматриваемом в примере здании потребует дополнить систему 12 «солнечными» батареями и двумя ветрогенераторами, увеличит мощность инверторов и количество резервных аккумуляторов.

Вывод

В результате проведенных исследований разработана методика определения требуемой мощности ветрогенератора и солнечных модулей в составе гибридной установки для обеспечения автономного усадебного здания необходимой энергией на протяжении круглого года. В процессе четырех этапов подбора мы получаем сбалансированную комбинированную систему, использующую энергию солнца и ветра, с оптимальными параметрами установок, что позволит исключить работу системы вхолостую и, как следствие, снизить стоимость энергоснабжения автономного энергоэффективного усадебного здания.

Однако для использования данных систем повсеместно требуется провести дополнительные исследования как в области повышения эффективности преобразования энергии ветра и солнца в электрическую, так и в областях, связанных с другими направлениями повышения энергоэффективности. Примерами таких направлений являются солнечные пассивные системы, энергосберегающие конструктивные решения ограждающих конструкций, автоматизация инженерных решений в соответствии с внешними условиями и режимами работы здания.

Список литературы

1. Мартиросов, С.Н. Разработка метода выбора параметров комбинированных ветро-фотоэлектрических энергоустановок для автономного сельского дома: дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Мартиросов. – М., 2001.
2. <http://krasnodar-meteo.ru/> – Метеостатистика Краснодарского края.
3. Онищенко, С.В. Автономная система энергоснабжения жилого дома / С.В. Онищенко // Жилищное строительство. – 2009. – №7. – С. 10–12.

References

1. Martirosov, S. Design method for choosing the parameters of combined wind and photovoltaic power plants for autonomous farmhouse: Dis. ... Candidate of Technical Sciences / S. Martirosov. – M., 2001.
2. <http://krasnodar-meteo.ru/> – Meteorologic of Krasnodar region.
3. Onischenko, S. Autonomous energy supply system residential building / S. Onischenko // CIVIL BUILDING. – 2009. – №7. – P. 10–12.

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.

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail:andreev3007@rambler.ru

Салмин Сергей Михайлович,
аспирант 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

Grishin Boris Mikchailovich,
Doctor of Science, Head of the department
«Water supply, sewerage and hydraulic
engineering»
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Water supply, sewerage
and hydraulic engineering»
E-mail:andreev3007@rambler.ru

Salmin Sergey Mikhailovichh,
Postgraduate of the department «Water
supply, sewerage and hydraulic engineering»

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУПНОЗЕРНИСТОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАГРУЗКИ ПРИ ФИЛЬТРОВАНИИ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ

Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, С.М. Салмин

Приведены формулы для определения гидравлического уклона и потерь напора при турбулентном фильтровании коагулированной природной воды через слой крупнозернистой контактной загрузки. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании контактных камер коагуляции на водопроводных очистных сооружениях.

Ключевые слова: природная вода, контактная коагуляция, крупнозернистая загрузка, турбулентное фильтрование, гидравлическое сопротивление.

CONFORMITIES OF LARGE GRANULAR CONTACT LOAD HYDRAULIC RESISTANCE CHANGE UNDER WATER SUSPENSION FILTRATION

B. M. Grishin, S. Yu. Andreev, S. M. Salmin

The formulas for definition of hydraulic slope and head loss under turbulent filtration of coagulated natural water through large granular contact load layer are given. Received dependences may be used in designing water purification works contact coagulate chambers.

Keywords: natural water, contact coagulation, large granular load, turbulent filtration, hydraulic resistance.

Природные воды представляют собой малоконцентрированные суспензии, в состав которых входят частицы примесей (дисперсной фазы), находящиеся во взвешенном и коллоидном состояниях. Для повышения эффективности работы отстойников, осветлителей и фильтров на станциях водоподготовки широко используется коагуляционная обработка воды.

Известно, что процесс коагуляции примесей природных вод значительно ускоряется в присутствии дополнительных поверхностей раздела, которые могут быть образованы за счёт аэрирования воды пузырьками воздуха, введения замутнителей, а также пропускания воды через взвешенные или стационарные слои контактной массы [1]. В качестве контактной массы могут выступать хлопья ранее образовавшегося осадка, а

также зернистые загрузки – песок, антрацит, дроблёный керамзит, щебень или гравий. Адсорбция скоагулированных частиц дисперсной фазы водной суспензии на поверхности зёрен контактной массы получила название контактной коагуляции [1]. Характерной особенностью данного процесса является высокая скорость прилипания образующихся после введения коагулянта микрохлопьев к поверхности зернистой загрузки, намного превышающая скорость взаимной агломерации частиц примесей и продуктов гидролиза коагулянта в свободном объеме воды. Другими отличительными особенностями контактной коагуляции являются независимость процесса от щелочности, рН и температуры воды, а также уменьшение на 30-40 % требуемых доз реагентов по сравнению с коагуляцией в свободном объеме. Процесс контактной коагуляции осуществляется в смесителях со взвешенным слоем мелкозернистого материала, контактных осветлителях и реакторах-осветлителях [1, 2, 3].

К недостаткам работы смесителя со взвешенным слоем мелкозернистого кварцевого песка следует отнести большой объем выноса контактной массы при увеличении скорости восходящего потока воды и возможное засорение отводящего трубопровода. В контактных осветлителях и реакторах-осветлителях процесс контактной коагуляции происходит одновременно с задержанием примесей в толще контактной загрузки. Поэтому в этих сооружениях поддерживается ламинарный режим фильтрования, и их удельная производительность невелика.

На крупных водоочистных комплексах практически процесс могут представлять камеры с крупнозернистой контактной загрузкой, обладающие незначительным гидравлическим сопротивлением и позволяющие осуществлять процесс контактной коагуляции при высоких значениях скорости фильтрования.

Известно [4], что при турбулентном фильтровании обработанной коагулянтom загрязнённой воды сопротивление крупнозернистой загрузки в течение первых 2,5-3 часов растёт, а потом стабилизируется и в дальнейшем не изменяется при заданной скорости фильтрования воды, что соответствует предельной насыщаемости (заилению) порового пространства загрузки отложениями (осадком).

При смешении природной воды с коагулянтom в толще слоя крупнофракционной контактной массы на выходе из слоя образуется большое количество хорошо сформированных контактных хлопьев, более интенсивно осаждающихся в отстойнике, по сравнению с агломератами скоагулированных частиц, образующихся в воде при применении типового дырчатого или перегородчатого смесителя.

Способ контактной коагуляции при турбулентном фильтровании через крупнозернистую загрузку может быть использован на водоочистных станциях с реагентной обработкой и двухступенчатой схемой осветления природной воды отстаиванием и фильтрованием. На таких станциях смесительные камеры с контактной загрузкой из гравия или щебня можно устанавливать перед отстойниками в качестве самостоятельных сооружений или как дополнительные элементы в составе типовых смесителей (рис. 1) [5].

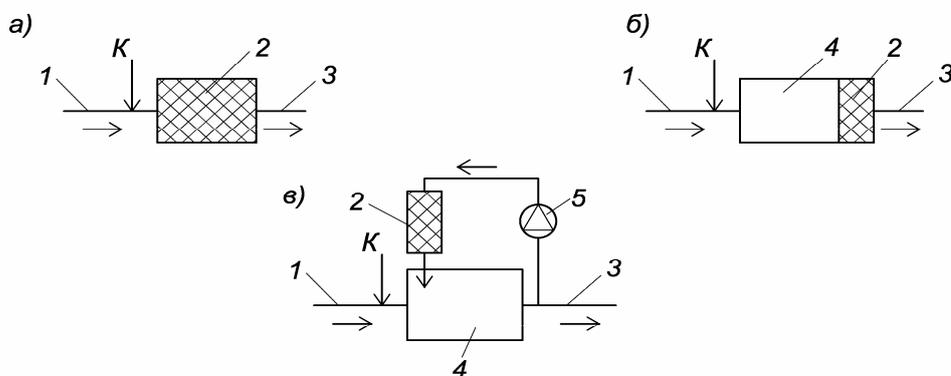


Рис. 1. Варианты схем коагуляционной обработки воды с применением смесительных камер с контактной крупнозернистой загрузкой: 1 – подача исходной воды; 2 – камера с контактной загрузкой; 3 – отвод обработанной воды на отстойник; 4 – типовой смеситель; 5 – водоподъемное устройство; К – коагулянт

Для проектирования и расчёта смесительных камер с крупнозернистой загрузкой необходимо знать закономерности турбулентного фильтрования малоконцентрированной водной суспензии, сопровождающегося отложением осадка в поровом пространстве зернистой загрузки.

Одной из основных характеристик сопротивления слоя контактной массы является гидравлический уклон i , который может быть определен через скоростной напор потока жидкости в поровом пространстве загрузки:

$$i = \frac{\Psi}{4R} \cdot \frac{u^2}{2g},$$

где Ψ – коэффициент сопротивления; R – гидравлический радиус зернистой загрузки, м; u – действительная скорость фильтрования, м/с; g – ускорение свободного падения, $g=9,81$ м/с².

На основании обработки большого количества экспериментальных данных Карман предложил формулу для определения коэффициента сопротивления при фильтровании [6]:

$$\Psi = \frac{5}{\text{Re}} + \frac{0,4}{\text{Re}^{0,1}}. \quad (1)$$

При ламинарном режиме движения ($\text{Re} < 3 \div 4$) второй член в правой части формулы (1) пренебрежимо мал по сравнению с первым членом, и в данном случае имеет место линейный закон сопротивления

$$\Psi = \frac{5}{\text{Re}}.$$

При турбулентной фильтрации ($\text{Re} > 5$) зависимость (1) переходит в другую форму:

$$\Psi = \frac{0,4}{\text{Re}^{0,1}}. \quad (2)$$

Минцем Д.М. была получена формула для определения коэффициента Ψ при любом режиме движения [6]:

$$\Psi = \frac{Pm^3d}{L\rho v^2 6\alpha_\phi(1-m)} = \frac{gim^3d}{v^2 6\alpha_\phi(1-m)}, \quad (3)$$

где m – пористость зернистого материала; d – эквивалентный диаметр зерен загрузки; P – перепад давления, Па; v – расчётная скорость фильтрования, $v=um$, м/с; L – длина пути фильтрования, м; α_ϕ – коэффициент формы зерен.

Число Рейнольдса, по Д.М. Минцу [6]:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{6\mu(1-m)\alpha_\phi}. \quad (4)$$

Подставив значение числа Рейнольдса из (4) в (2), получим:

$$\Psi = \frac{0,4 \cdot 1,196 \cdot \mu^{0,1} (1-m)^{0,1} \alpha_\phi^{0,1}}{\rho^{0,1} v^{0,1} d^{0,1}}. \quad (5)$$

Приравняв левые части уравнений (3) и (5), выведем формулу для определения гидравлического уклона в произвольный момент времени:

$$i = 2,87 \cdot v^{1,9} \cdot \rho^{-0,1} \cdot \mu \cdot \alpha_\phi^{1,1} \frac{(1-m)^{1,1}}{m^3 \cdot d^{1,1} \cdot g}. \quad (6)$$

Для начального момента фильтрования ($t=0$)

$$i=2,87 \cdot v_0^{1,9} \cdot \rho^{-0,1} \cdot \mu \cdot \alpha_{\phi}^{1,1} \frac{(1-m_0)^{1,1}}{m_0^3 \cdot d^{1,1} \cdot g}, \quad (7)$$

где v_0 – скорость фильтрования в чистой загрузке, м/с; m_0 – пористость чистой загрузки.

Составляя отношение уклонов при постоянной скорости фильтрования, получаем:

$$\frac{i}{i_0} = \left(\frac{1-m}{1-m_0} \right)^{1,1} \left(\frac{m_0}{m} \right)^3. \quad (8)$$

Пористость загрузки m в любой момент времени фильтрования связана с насыщенностью порового пространства отложениями δ соотношением [6]

$$\delta = \frac{m_0 - m}{m} \text{ или } 1 - \delta = \frac{m}{m_0}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что

$$1 - m = 1 - m_0(1 - \delta). \quad (10)$$

С учётом этого первую дробь в правой части уравнения (8) можно представить в виде

$$\frac{1-m}{1-m_0} = \frac{1-m_0 + m_0\delta}{1-m_0} = 1 + \frac{m_0\delta}{1-m_0} = F, \quad (11)$$

где F – параметр, зависящий от δ и m_0 .

В диапазоне значений m_0 от 0,4 до 0,6 и δ от 0,1 до 0,8 зависимость F от δ имеет линейный характер (рис. 2).

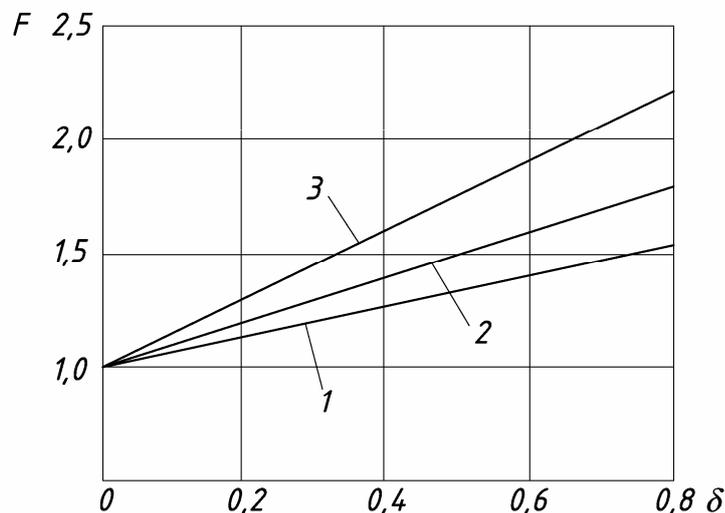


Рис. 2. Графики зависимости параметра F от насыщенности зернистого слоя:

1 – при $m_0=0,4$; 2 – при $m_0=0,5$; 3 – при $m_0=0,6$

Численные значения параметра F при различных вариациях m_0 и δ показаны в таблице.

Значения параметра F для зернистого слоя при турбулентном режиме фильтрования

Начальная пористость m_0	Параметр F				
	$\delta=0,1$	$\delta=0,2$	$\delta=0,4$	$\delta=0,6$	$\delta=0,8$
0,4	1,07	1,13	1,265	1,40	1,53
0,5	1,1	1,20	1,40	1,60	1,80
0,6	1,15	1,30	1,60	1,90	2,20

В начальный момент фильтрования ($t=0$, $\delta=0$) параметр F равен 1 и возрастает с увеличением значения насыщенности порового пространства (см. рис. 2).

Подставив (11) в (8), с учётом формулы (9) получим в окончательном виде:

$$\frac{i}{i_0} = F^{1,1} \left(\frac{m_0}{m} \right)^3 = F^{1,1} \left(\frac{1}{1-\delta} \right)^3. \quad (12)$$

Таким образом, при турбулентном режиме фильтрования отношение гидравлического уклона в любом сечении зернистой загрузки в произвольный момент времени к начальному гидравлическому уклону прямо пропорционально параметру F в степени 1,1 и обратно пропорционально кубу отношения пористостей.

Для фильтрующих загрузок с различными размерами зерен в условиях предельной насыщенности при турбулентном режиме фильтрования из (6) и (7) получим выражение для соотношения гидравлических уклонов:

$$\frac{i_1}{i_0} = \left(\frac{1-m_1}{1-m_2} \right)^{1,1} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{1,1} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{1,9} \left(\frac{1-\delta_{\text{пр}2}}{1-\delta_{\text{пр}1}} \right)^3, \quad (13)$$

где m_1 и $\delta_{\text{пр}1}$ – пористость и предельная насыщенность порового пространства, определяемые экспериментально при фильтровании воды через загрузку с эквивалентным диаметром зерен d_1 при скорости v_1 ; m_2 и $\delta_{\text{пр}2}$ – пористость и предельная насыщенность, соответствующие значениям v_2 и d_2 , отличным от экспериментальных.

Рассмотрим случай (рис. 3) движения обработанной коагулянтной природной воды через затопленную крупнозернистую загрузку (контактную массу) 3, которая находится внутри контактной камеры 2 с дырчатым дном 4, расположенной в безнапорном резервуаре, уровень воды в котором постоянен. Вода поступает в контактную камеру с постоянным расходом Q ; следовательно, расчётная скорость фильтрования v также постоянна.

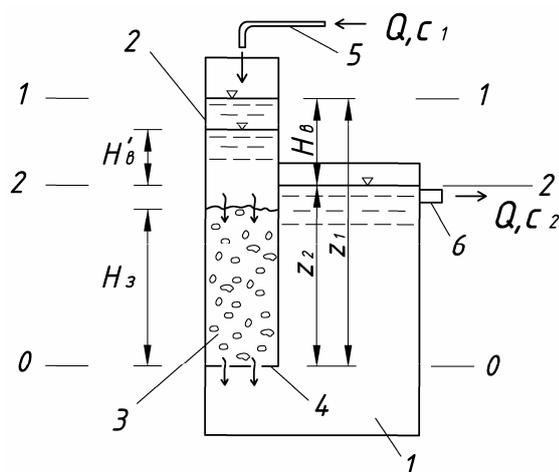


Рис. 3. Схема к определению гидравлического уклона при фильтровании коагулированной воды через крупнозернистую загрузку:

- 1 – резервуар; 2 – контактная камера; 3 – крупнозернистая загрузка; 4 – дырчатое днище; 5 – трубопровод подачи коагулированной воды; 6 – патрубок отвода воды из резервуара

В начальный момент фильтрации глубина воды в камере относительно уровня воды в смесителе будет равна $H'_в$. По мере накопления осадка в порах крупнозернистой загрузки высота воды в контактной камере будет возрастать и при достижении предельной насыщенности порового пространства станет постоянной и равной $H_в$ при расходе потока воды $Q = \text{const}$. В этом случае концентрация C_1 скоагулированной взвеси, поступающей в контактную камеру, будет равна концентрации взвеси C_2 , выходящей из камеры в резервуар через дырчатое днище 4.

При установившемся режиме работы резервуара и контактной камеры уравнение постоянства удельной энергии для фильтрационного потока в сечениях 1-1 и 2-2 будет выглядеть следующим образом (см. рис. 3):

$$H_в = Z_1 - Z_2 = h_{тр} + h_д, \quad (14)$$

где Z_1 – расстояние по высоте от отметки уровня воды в контактной камере до плоскости сравнения 0-0, проходящей на уровне днища камеры, м; Z_2 – расстояние по высоте от отметки уровня воды в безнапорном резервуаре до плоскости 0-0, м; $h_{тр}$ – потери напора в зернистом слое, м; $h_д$ – потери напора в дырчатом днище, м.

При эквивалентном диаметре зерен загрузки $d > 0,003$ м и скорости фильтрации $v > 0,01$ м/с число Рейнольдса, определяемое по (4) для m от 0,2 до 0,6, всегда больше 5; следовательно, режим движения водной суспензии в порах загрузки будет турбулентным. Пренебрегая потерями напора в дырчатом днище и выражая потери напора $h_{тр}$ формулой Дарси – Вейсбаха (через скоростной напор), перепишем уравнение (14) в виде

$$H_в = h_{тр} = \psi \frac{H_з}{4R} \cdot \frac{u^2}{2g} = \psi \frac{H_з}{4m^2 R} \frac{v^2}{2g}, \quad (15)$$

где ψ – коэффициент сопротивления, определяемый для турбулентного режима фильтрации по формуле (2); $H_з$ – высота слоя зернистой загрузки, м.

Подставив значение ψ из (2) в (15), с учётом (4) получим уравнение для нахождения глубины воды в контактной камере при турбулентном режиме фильтрации в момент времени t :

$$H_в^t = \frac{0,1 H_з}{m^2 R} \left[\frac{6\mu(1-m)}{\rho \cdot d} \right]^{0,1} \frac{v^{1,9}}{2g}. \quad (16)$$

Как уже отмечалось, в условиях предельной насыщенности порового пространства ($\delta = \delta_{пр}$) при турбулентном фильтровании сопротивление загрузки становится постоянным. В этом случае при $Q = \text{const}$ и $C_1 = C_2 = \text{const}$ глубина воды в контактной камере также постоянна и с учётом (12) определяется по формуле

$$H_в = H_з \cdot i_0 \cdot F^{1,1} \left(\frac{1}{1 - \delta_{пр}} \right)^3. \quad (17)$$

Формулы (16) и (17) могут быть использованы для определения требуемой высоты контактных камер, устраиваемых на водопроводных очистных сооружениях для смешения воды с коагулянтном.

Выводы

1. Выявлен характер зависимости между гидравлическим уклоном при заилённом поровом пространстве крупнозернистой загрузки в произвольный момент времени и начальным гидравлическим уклоном (в чистой загрузке) в условиях турбулентного режима фильтрации малоцентрированной водной суспензии.

2. Приведены аналитические зависимости, позволяющие определить требуемую высоту смесительных камер с контактной загрузкой, устраиваемых в качестве самостоятельных сооружений или в виде элементов безнапорных типовых смесителей водоочистных станций для интенсификации процессов коагуляции природных вод.

Список литературы

1. Фрог, Б.Н. Водоподготовка / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко. – М.: Изд-во МГУ, 2003.
2. Бабенков, Е.Д. Исследование работы вертикального смесителя с фонтанирующим слоем зернистого материала / Е.Д. Бабенков, Т.П. Лимонова // Тр. ВНИИ ж-д. транспорта. – 1979. – Вып. 613. – С. 31–43.
3. Сколубович, Ю.Л. Повышение эффективности работы водопроводных станций / Ю.Л. Сколубович, Е.Л. Войтов, А.М. Никитин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – №2. – С. 21–25.
4. Грабовский, А.П. Математическая модель коагуляции и регенерации крупнозернистых слоёв малой толщины / А.П. Грабовский, В.И. Прогульный // Химия и технология воды. – 1990. – Т. 12, №6.
5. Гришин, Б.М. Использование крупнозернистой контактной загрузки для интенсификации процессов коагуляции примесей природных вод / Б.М. Гришин, А.Н. Кошев, С.М. Салмин // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сб. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 72–75.
6. Минц, Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды / Д.М. Минц. – М.: Стройиздат, 1964.

References

1. Frog, B.N. Water treatment / B.N. Frog, A.P. Levchenko. – M.: Publishing house MSU. 2003.
2. Babenkov, E.D. Investigation of vertical mixer with spouting layer of granular material work / E. D. Babenkov, T. P. Limonova // Transactions of AUSII railway transport. – 1973. – Issue 613. – P. 31–43.
3. Skolubovich, Yu.L. Increasing of water purification works effectivity / Yu.L. Skolubovich, E.L. Voitov, A.M. Nikitin // Water supply and sanitary equipment. – 2011. – №2. – P. 21–25.
4. Grabovsky, A.P. Mathematical model of large grain thin layers mud grouting and regeneration / A.P. Grabovsky, V.I Progulny // Chemistry and water technology. – 1990. – V. 12. – №6.
5. Grishin, B.M. Application of large grain contact load for nature water impurity coagulation processes intensification / B.M. Grishin, A.N. Koshev, S.M. Salmin // Problems of energy economy in industrial and housing – municipal complexes: Collected transactions of XIV International scientific practical conference. – Penza: PSUAC, 2013. – P. 72–75.
6. Mintz, D.M. Theoretical foundations of water purification technology / D.M. Mintz. – M.: СРН, 1964.

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

Комаров Виктор Александрович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Болдырева Ольга Вячеславовна,
аспирант, старший преподаватель кафедры
«Строительные конструкции»
E-mail: boov@yandex.ru

Жуков Александр Николаевич,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: stroyconst@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

Komarov Victor Alexandrovich,
Candidate of Sciences, Professor
of the department «Building constructions»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Boldyreva Olga Vajcheslavovna,
Postgraduate, Senior Lecturer
of the department «Building constructions»
E-mail: boov@yandex.ru

Zhukov Alexandr Nikolaevich,
Postgraduate of the department «Building
constructions»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

КОНСОЛЬНЫЕ ОПОРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РИГЕЛЕЙ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СИЛ И ОПОРНОГО ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА

В.А. Комаров, О.В. Болдырева, А.Н. Жуков

На основе разработанной программы физического эксперимента консольных опор железобетонных ригелей установлены изменения усилий образования и развития трещин, разрушающих усилий, а также схем разрушений в зависимости от приложения нагрузки и опорного изгибающего момента. Рассмотрен новый вид разрушения консольных опор железобетонных ригелей – срез сжатой полосы бетона.

Ключевые слова: консольная опора ригеля, опорный изгибающий момент, трещины, сжатая наклонная полоса бетона, схемы разрушений.

REINFORCED GIRTH RAILS CONSOLE SUPPORTS AT JOINT ACTION OF VERTICAL FORCES AND BEARING BENDING MOMENT

V.A. Komarov, O.V. Boldyreva, A.N. Zhukov

Description and analysis of experimental results of researching while changing basic factors – the scheme of load application and the value of supporting bending moment are given. They have determined the change of efforts creating and developing cracks, destruction efforts and schemes of destruction depending on the researched factors.

Keywords: girth rail console support, supporting bending moment, cracks, destruction schemes.

При компоновке сборных железобетонных каркасов узлы соединения ригелей с колоннами довольно часто решаются с защемлением ригеля путём соединения с помощью пластин рабочей арматуры, расположенной в верхней зоне ригеля с закладными деталями колонн.

Необходимость научно-экспериментальных исследований определяется отсутствием нормативных методов расчёта консольных опор ригелей с жёстким защемлением, а также нормативной экспериментальной базы, позволяющей обеспечить безопасность узлов соединения ригелей с колоннами на стадии проектирования, строительства и эксплуатации каркасных зданий.

Конструктивные решения и испытания образцов выполнены по программе физического эксперимента, представленной на рис. 1.

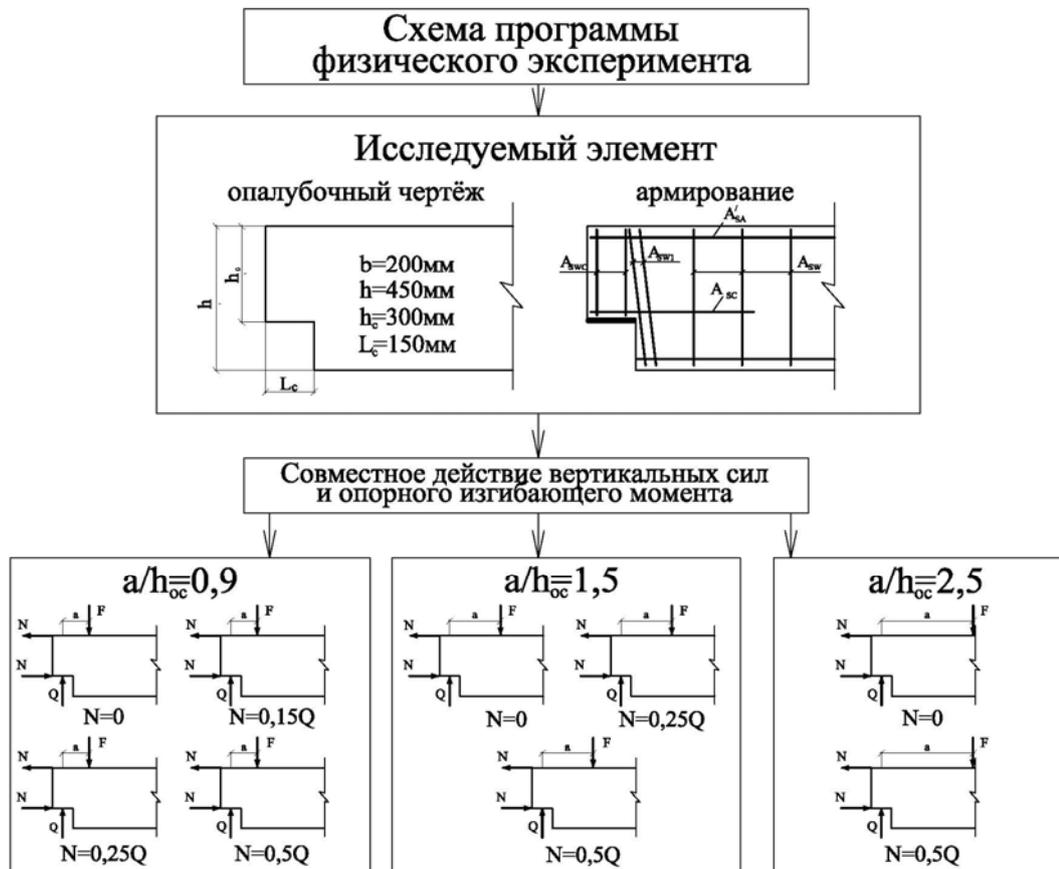


Рис. 1. Схема программы исследований (физического эксперимента) консольных опор ригелей при совместном действии вертикальных сил и опорного изгибающего момента

Опытные образцы имели натуральные размеры ригелей сборных каркасов межвидового применения. Было запроектировано девять образцов. В качестве сосредоточенной арматуры A_{sw1} у верхнего угла подрезки принимались два спаренных замкнутых хомута $4\varnothing 12$ А-III, несколько наклоненных в сторону оси опоры. Это делалось для того, чтобы в верхнем уровне ригеля разместить закладную деталь, соединяющую арматуру ригеля A_{sa}^1 , воспринимающую растяжение от опорного момента ($2\varnothing 18$ А-III), с закладными деталями колонн. В качестве продольной арматуры консоли A_{sc} приняты $2\varnothing 18$ А-III, в качестве рядовых хомутов $A_{sw} - 2\varnothing 8$ А-III с шагом 100 мм.

Программа физического эксперимента включала исследование влияния на сопротивление консольных опор ригелей двух факторов. Первый фактор – это уровень соотношения Q/N вертикальных и горизонтальных сил от действия опорного изгибающего момента при поочередном изменении горизонтальных сил от 0 до $0,15Q$; $0,25Q$; $0,5Q$, где Q – разрушающая вертикальная нагрузка консольных опор при условии отсутствия горизонтальной нагрузки, $N=0$. При испытании вертикальная нагрузка поэтапно возрастала до разрушающей величины Q_{test} . Вторым исследуемым фактором являлось положение вертикальной силы относительно опоры (пролёт среза). Пролёт среза a/h_{oc} (a – расстояние от линии действия реакции опоры до приложения силы, h_{oc} – рабочая высота консоли ригеля) принимался поочередно равным 0,9; 1,5; 2,5 при поэтапном действии вертикальной нагрузки.

Образцы изготавливались по заводской стандартной технологии. Для испытания образцов ригелей с защемлением на опоре была разработана специальная силовая установка, которая состоит из двух силовых систем. Первая система представляла собой раму, которая применялась для нагружения вертикальной нагрузкой в ручьях

силового пола. Вторая система (для развития горизонтальных сжимающих и растягивающих усилий от опорного изгибающего момента) – это горизонтальные силовые рамы; она состояла из продольных боковых тяг и двух поперечных стержней, один из которых проходит через отверстие в средней по длине части ригеля и на уровне низа опорной консоли по высоте ригеля. В результате образуются прямоугольные горизонтальные контуры, внутри которых устраивается система, соединяющая внешнюю поперечную часть силового контура рамы с консолью ригеля. В этой системе располагаются два 25-тонных динамометра, фиксирующих величину горизонтального усилия.

Нагружение вертикальной нагрузкой производилось гидравлическим домкратом ДГ-100. Общий вид силового комплекта показан на рис.2.

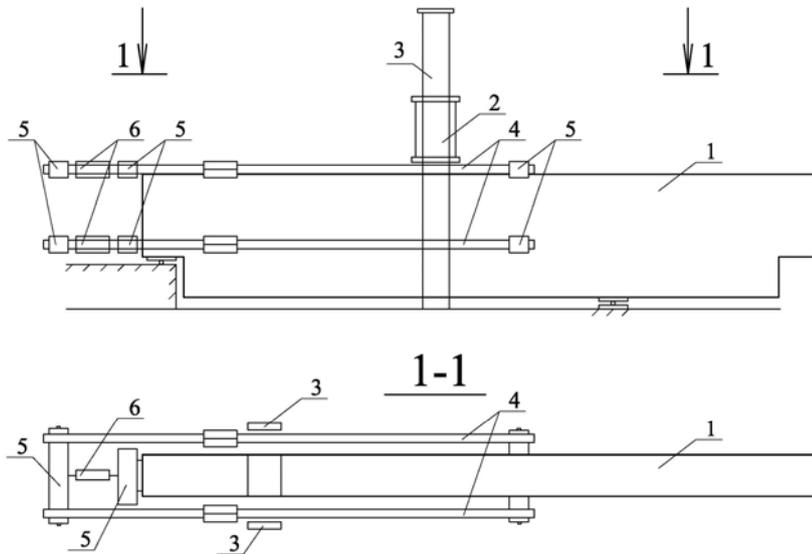


Рис. 2. Схема установки для проведения испытаний:
1 – образец; 2 – гидродомкрат; 3 – траверса; 4 – механический домкрат;
5 – упоры; 6 – динамометр

В образцах ригелей изучались особенности напряжённо-деформированного состояния приопорных участков ригелей при совместном действии опорного изгибающего момента и вертикальных сил. Поскольку в зависимости от соотношения расстояния приложения силы относительно оси опоры изменяются виды разрушения опорных участков, образцы были разделены на три группы. В первую группу входили образцы, при испытании которых вертикальные силы прикладывались на расстоянии $a=0,9h_{oc}$, во второй и третьей группах – на расстоянии $a=1,5h_{oc}$ и $a=2,5h_{oc}$ соответственно. Величины растягивающих и сжимающих сил составляли 0; 0,15; 0,25; 0,5 от разрушающей вертикальной нагрузки.

На основе анализа результатов испытаний выявлена характерная система образования наклонных трещин, расположенных по полю испытываемых консольных опор ригелей. Выявлены известные трещины, полученные ранее при испытании консольных опор ригелей при действии вертикальных сил:

– магистральная наклонная трещина, исходящая из верхнего угла подрезки Т-1 и из нижнего угла подрезки Т-2 (рис. 3, 4);

– трещины, расположенные в пределах наклонной сжатой полосы бетона между опорной и грузовой площадками Т-К (рис. 5).

Экспериментально выявлен новый класс трещин Т- τ , характеризующих срез сжатой полосы бетона при совместном действии вертикальных сил и опорного изгибающего момента. Они находятся вдоль сжатой наклонной полосы бетона в виде серии наклонных трещин, которые располагаются друг за другом, выделяя зону среза, внутри которой концентрируются траектории главных сжимающих напряжений σ_1 (рис. 6).

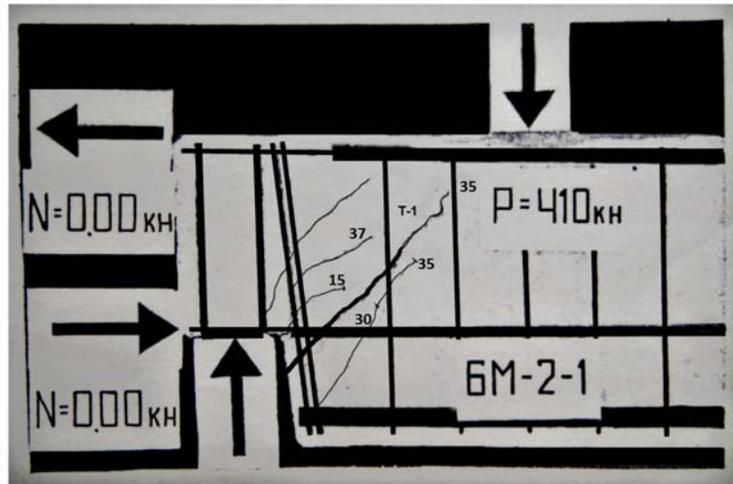


Рис. 3. Магистральная наклонная трещина, исходящая из верхнего угла подрезки Т-1

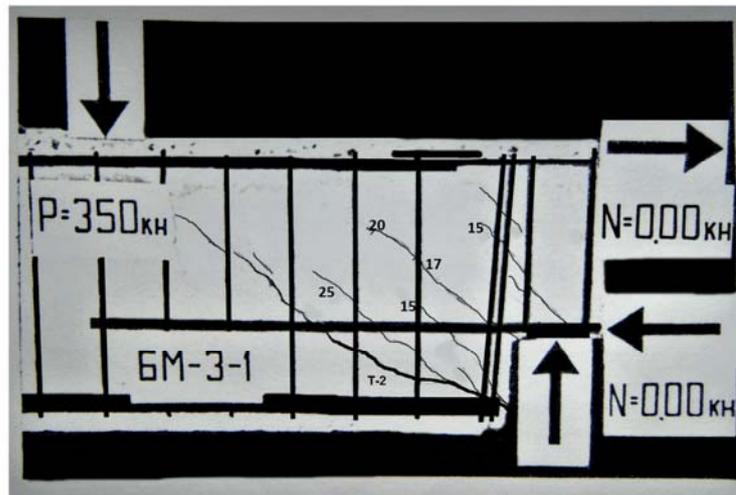


Рис. 4. Магистральная наклонная трещина, исходящая из нижнего угла подрезки Т-2

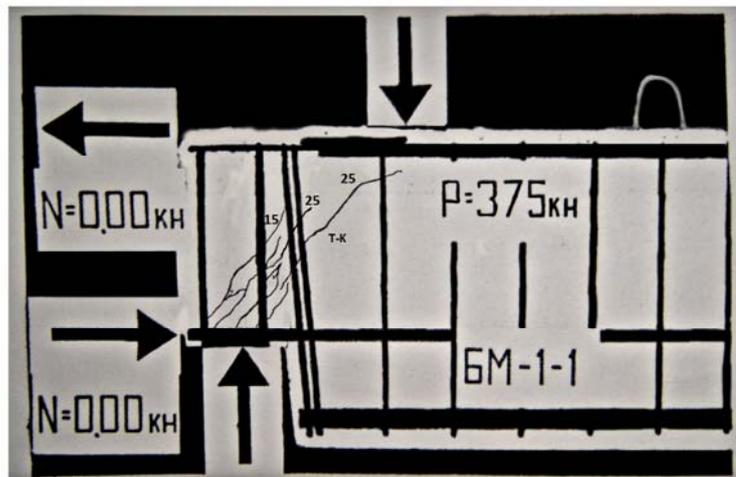


Рис. 5. Трещины, расположенные в пределах сжатой полосы бетона Т-К

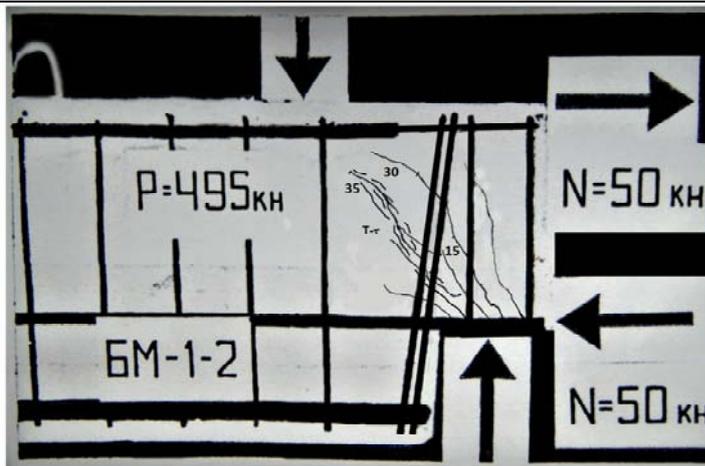


Рис. 6. Трещины, расположенные друг за другом и выделяющие зону среза вдоль сжатой полосы бетона Т-τ

Важно отметить, что траектории трещин среза Т-τ совпадают с линиями, соединяющими точки максимальных значений касательных напряжений.

Предлагаемая классификация трещин, по сути, является критерием определения схем разрушения.

Для оценки результатов экспериментальных исследований на основании показаний тензодатчиков построено поле напряжённо-деформированного состояния приопорных участков ригелей. Выделены характерные напряжённые зоны в виде полосы концентрации главных напряжений σ_1 и σ_2 , а также максимальных значений касательных напряжений τ_{\max} ; зоны местного действия главных сжимающих σ_1 и растягивающих σ_2 напряжений.

Как оказалось, сопротивление выделенной наклонной полосы бетона концентрации напряжений ($\sigma_{\max 1}$ либо τ_{\max}) определяет прочность консольной опоры по сжатой зоне.

Экспериментально получены следующие схемы разрушения, которые квалифицируются как разрушение сжатой наклонной полосы бетона консольной опоры ригеля:

- разрушение в результате раздробления бетона в сжатой полосе от сжатия;
- разрушение сжатой наклонной полосы в результате среза (сдвига) вдоль сжатой полосы бетона.

Получена новая схема разрушения сжатой наклонной полосы при совместном действии вертикальных сил и опорного изгибающего момента.

Разрушение образцов первой группы ригелей при пролёте среза $a/h_{oc}=0,9$ (рис.7) происходило по сжатой полосе бетона между опорной и грузовой площадками, причём при отсутствии опорного изгибающего момента наблюдалась схема разрушения от сжатия, при совместном действии вертикальных сил и опорного изгибающего момента – схема разрушения от среза вдоль сжатой полосы.

Образцы второй группы ригелей при пролёте среза $a/h_{oc}=1,5$ разрушены по наклонной трещине Т-1, исходящей из внутреннего угла подрезки при отсутствии опорного изгибающего момента и от среза вдоль сжатой полосы при совместном действии вертикальных сил и опорного изгибающего момента.

Разрушение образцов третьей группы ригелей при пролёте среза $a/h_{oc}=2,5$ происходило по наклонной трещине Т-2, исходящей из нижнего угла подрезки.

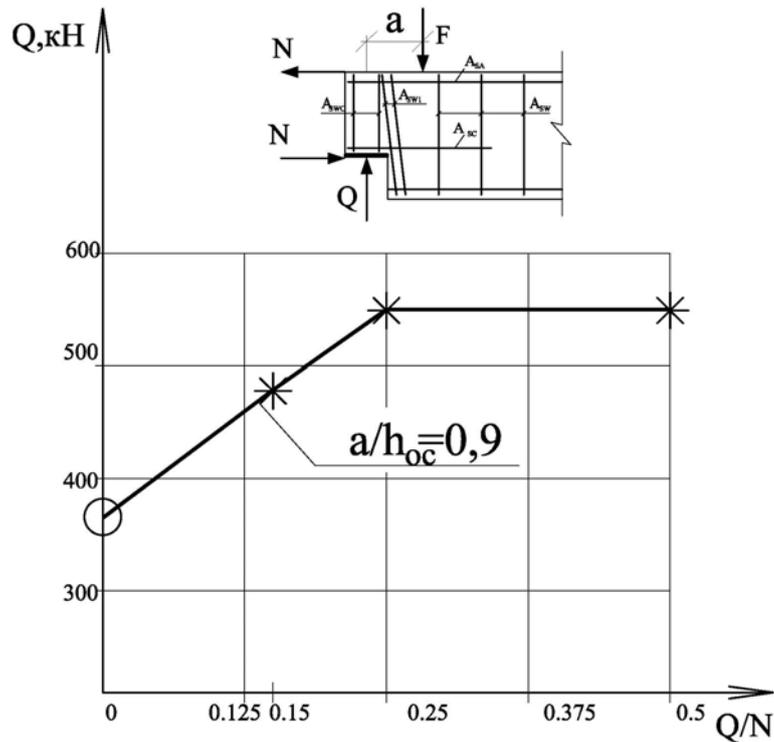


Рис. 7. График закономерности изменения опытных разрушающих усилий по наклонной сжатой полосе бетона в зависимости от величины опорного изгибающего момента:

O – разрушение по сжатой полосе от действия сжимающих усилий;

* – разрушение по сжатой полосе от среза

Выводы

1. При оценке сопротивления консольных опор и приопорных зон железобетонных ригелей при совместном действии вертикальных сил и опорного изгибающего момента за основу целесообразно принять стержневые и каркасно-стержневые модели.

2. Жёсткое защемление консоли ригеля на опоре в 1,3 раза повышает сопротивление сжатой наклонной полосы бетона, изменяя схему разрушения сжатой бетонной полосы.

3. Основным видом разрушения консольных опор железобетонных ригелей при совместном действии вертикальных сил и опорного изгибающего момента является срез сжатой полосы бетона.

Список литературы

1. Баранова, Т.И. Аналоговые каркасно-стержневые модели сопротивления несущих элементов каркасов многоэтажных зданий / Т.И. Баранова, В.А. Комаров, Э.В. Егинов. – М.: Изд-во «Спутник +», 2011. – 182 с.

References

1. Baranova, T.I. Analogue frame-rod models of multi-storied buildings bearing elements resistance / T.I. Baranova, V.A. Komarov, E.V. Eginov. – M.: Satellite, 2011. – 182 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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail:andreev3007@rambler.ru

Камбург Владимир Григорьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Прикладная
математика и информатика»

Петрунин Алексей Алексеевич,
аспирант кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»

Князев Владимир Владимирович,
аспирант кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»

Давыдов Геннадий Павлович,
аспирант кафедры «Физика и химия»

*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

Kamburg Vladimir Grigoryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Information –
computertional systems»

Petrinin Aleksey Alekseevich,
Postgraduate of the department
«Water supply, sewerage and hydranlic
Luginecring»

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,
Postgraduate of the department
«Water supply, sewerage and hydranlic
Luginecring»

Davydov Gennady Pavlovich,
Postgraduate of the department
«Phisics and Chemistry»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕДАЧИ ИЗ ВСПЛЫВАЮЩИХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, А.А. Петрунин, В.В. Князев, Г.П. Давыдов

Приведены результаты теоретических исследований процессов массопередачи кислорода в жидкость. Получено уравнение, позволяющее определять величину коэффициента массопередачи для турбулентного режима всплывания пузырька воздуха.

Ключевые слова: система аэрации, пузырек воздуха, турбулентный режим всплывания, скорость массопередачи.

MATHEMATICAL MODELLING OF MASS TRANSFER PROCESSES KINETICS FROM FLOATING GAS BUBBLES IN WASTE WATER PURIFICATION TICHNOLOGIES

S.Yu. Andreev, V.G. Kamburg, A.A. Petrunin, V.A. Knyazev, G.P. Davydov

The results of theoretical investigations of mass transfer processes of oxygen into liquid are given. The equation for coefficient of mass transfer definition at turbulent regime of floating air bubble is received.

Keywords: aeration system, bubble of air, turbulent mode of ascension, mass transfer rates.

Процесс биохимического окисления органических загрязнений сточных вод в аэротенках происходит под воздействием биоценоза активного ила, для поддержания жизнедеятельности которого используются различные системы аэрации.

Система аэрации представляет собой комплекс устройств и оборудования, обеспечивающий:

1. Подачу и распределение воздуха (кислорода) в объеме аэротенка;
2. Поддержание активного ила во взвешенном состоянии и создание необходимых гидродинамических условий работы аэротенка.

Основным техническим признаком, определяющим скорость массопередачи, а следовательно, и эффективность работы системы аэрации является способ подачи и распределения в воде воздуха.

В соответствии с этим основным технологическим признаком существующие аэраторы относятся к следующим системам:

1. Пневматической;
2. Механической;
3. Гидравлической;
4. Комбинированной.

Наибольшее распространение в технологических процессах биологической очистки сточных вод в аэротенках получили пневматические системы аэрации.

В пневматической системе аэрации подаваемый от нагнетательных установок воздух дробится на пузырьки в диспергирующих устройствах, размещаемых в определенных точках аэрационного бассейна. Всплывающие пузырьки воздуха служат источником снабжения иловой смеси кислородом воздуха, а также создают необходимые гидродинамические условия для перемешивания иловой смеси в аэрационном бассейне.

Первые образцы пневматических аэраторов были созданы в начале XX в. [2]. В этих аэраторах распределение пузырьков воздуха в аэрационном бассейне осуществлялось простейшим образом через перфорированные трубы. В 1913 г. английской фирмой «Джон Атвуд» был получен патент на систему тонкого диспергирования воздуха, предусматривающую применение мелкопористых пластин [1].

В основе массопередачи кислорода при аэрации лежит диффузия молекул кислорода из газовой фазы в жидкостную. Начало систематического изучения диффузии было положено в середине XIX века трудами Фика, который установил физическую аналогию процессов диффузии и теплопередачи, что позволило ему использовать уравнение Фурье для определения скорости диффузионного переноса кислорода в

жидкость $\frac{dm}{dt}$ из воздушных пузырьков:

$$\frac{dm}{dt} = -DA \frac{dC}{ay}, \quad (1)$$

где $\frac{dm}{dt}$ – скорость массопередачи, кг/с; D – коэффициент диффузии газа в жидкость (относительное количество газа, переносимое в жидкость через единицу поверхности контакта фаз газ–жидкость в единицу времени), м²/с; A – площадь поверхности межфазового контакта, м²; $\frac{dC}{ay}$ – градиент концентрации растворенного кислорода в направлении диффузии (в нормальном направлении к площади диффузии), кг/м⁴.

Общее решение уравнения диффузии (1) имеет вид :

$$\frac{dm}{dt} = K_L A (C_H - C), \quad (2)$$

где K_L – коэффициент массопередачи жидкой пленки (пленочный коэффициент массопередачи) м/с; C_H – концентрация насыщения жидкости газом кг/м³; C – концентрация растворенного газа в жидкости кг/м³.

В соответствии с «пленочной» теорией Льюиса и Уитмена, разработанной в 1923-1924 гг., величину пленочного коэффициента массопередачи рекомендуется определять как отношение коэффициента псевдостационарной молекулярной диффузии $D_{сд}$ (m^2/c) к толщине жидкостной пленки Y (м) [1]:

$$K_L = K_{LC} = \frac{D_{сд}}{Y}. \quad (3)$$

Дальнейшее развитие представления о процессах массопередачи кислорода получили в теории «проникания» (пенетрации), разработанной в 1935 г. Хигби, в соответствии с которой перенос кислорода из пузырька в жидкость происходит посредством нестационарной молекулярной диффузии через слой постоянно обновляющейся в процессе движения пузырька воздуха жидкостной пленки [1].

Считается, что прилегающий к слою жидкостной пленки слой воздуха внутри пузырька движется с той же скоростью. Слои движутся как единое целое и по отношению к газовой фазе элемент слоя жидкостной пленки можно считать неподвижным. Массопередача кислорода в движущийся элемент жидкости происходит путем нестационарной молекулярной диффузии в течение определенного времени до тех пор, пока этот элемент не сольется с остальным объемом жидкости. Хигби рекомендует определять величину пленочного коэффициента массопередачи по формуле

$$K_L = K_{LH} = \sqrt{\frac{4D_{нд} \cdot V_{п}}{\pi d_{п}}}, \quad (4)$$

где $D_{нд}$ – коэффициент нестационарной молекулярной диффузии, величина которого отличается от значения $D_{сд}$, m^2/c ; $V_{п}$ – скорость всплывания пузырька воздуха, m/c ; $d_{п}$ – диаметр пузырька воздуха, м.

В теории турбулентной диффузии, разработанной в 1951 г. П.В Данквертсом, было поставлено под сомнение существование ламинарной пленки на границе раздела фаз всплывающего пузырька [5]. В соответствии с разработанными представлениями элементы жидкости на поверхности пузырька находятся в контакте с газовой фазой в течение определенного времени, по истечении которого они отрываются с поверхности зародившимися там турбулентными вихрями и заменяются новыми. Вероятность смены рассматриваемого элемента жидкости на поверхности пузырька новым не зависит от возраста элемента, а средняя скорость обновления поверхности жидкости контактирующей с газовой фазой, зависит от гидродинамических условий и является постоянной величиной при установившемся режиме движения пузырька. Для характеристики этой скорости вводится понятие фактора обновления поверхности S (c^{-1}), равного доли поверхности, которая обновляется в единицу времени. Величину пленочного коэффициента в этом случае рекомендуется определять по формуле

$$K_L = K_{LT} = \sqrt{D_{тд} \cdot S}, \quad (5)$$

где $D_{тд}$ – коэффициент турбулентной диффузии, m^2/c .

В своей теории Данквертс не приводит описание какого-либо конкретного подхода для определения величины фактора обновления поверхности границы раздела фаз S .

Одна из попыток по определению численного значения S была сделана исходя из анализа баланса энергии (термодинамический подход) в работе [4]. Было высказано предположение, что процесс обновления поверхности раздела фаз под действием образующихся на ней турбулентных вихрей должен быть связан с работой, совершаемой на границе раздела фаз. Поскольку работа, совершаемая при обновлении поверхности раздела фаз, обусловлена наличием поверхностного натяжения, то величина доли новой поверхности, образующейся в единицу времени за счет турбулентного

обмена элементов жидкости на единице поверхности, исходя из теории размерности, может быть определена как

$$S = \frac{P}{\sigma_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где P – работа, совершаемая на единице поверхности в единицу времени, Дж/(м²·с); $\sigma_{\text{п}}$ – коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха, Дж/м².

Откуда

$$p = \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^3}{2}, \quad (7)$$

$$S = \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^3}{2\sigma_{\text{п}}} \quad S = \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^3}{2\sigma_{\text{п}}}, \quad (8)$$

где ζ – коэффициент гидродинамического сопротивления; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Поскольку S является величиной, обратной среднему времени экспозиции, и может быть интерпретирована как частота обновления поверхности, нами было предложено определять S не в виде отношения элементарной работы P к коэффициенту поверхностного натяжения $\sigma_{\text{п}}$, а как отношение секундной работы, совершаемой силами гидродинамического сопротивления $A_{\text{гс}}$, к поверхностной энергии пузырька воздуха $E_{\Delta\sigma}$ [2, 3]:

$$A_{\text{гс}} = \frac{F_{\text{гс}} \Delta l}{\Delta T} = \frac{F_{\text{гс}} v_{\text{п}} \Delta T}{\Delta T} = F_{\text{гс}} v_{\text{п}} = f_{\text{п}} \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^2}{2} v_{\text{п}} = f_{\text{п}} \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^3}{2}, \quad (9)$$

$$E_{\Delta\sigma} = \sigma_{\text{п}} S_{\text{п}}, \text{ Дж}, \quad (10)$$

где $F_{\text{гс}} = f_{\text{п}} \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^2}{2}$ – сила гидродинамического сопротивления, Н; Δl – расстояние, м,

на которое перемещается пузырек воздуха за время ΔT , с; $S_{\text{п}}$ – площадь поверхности пузырька, м²; $f_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения пузырька, м².

Тогда

$$S = \frac{A_{\text{гс}}}{E_{\Delta\sigma}} = f_{\text{п}} \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^3}{2} \cdot \frac{1}{\sigma_{\text{п}} S_{\text{п}}} = \frac{f_{\text{п}}}{S_{\text{п}}} \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^3}{2\sigma_{\text{п}}} = \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^3}{2\sigma_{\text{п}} K_{\phi}}. \quad (11)$$

Как видно из формул (8) и (11), предложенное нами уравнение для вычисления значения фактора обновления границы раздела фаз всплывающего пузырька воздуха отличается от формулы, предложенной в работе [4], лишь наличием дополнительного

безразмерного коэффициента формы пузырька воздуха $K_{\phi} = \frac{S_{\text{п}}}{f_{\text{п}}}$.

Введением коэффициента формы пузырька воздуха K_{ϕ} учитывается специфика сил поверхностного натяжения $F_{\text{пн}}$ и гидродинамического сопротивления $F_{\text{гс}}$. Силы гидродинамического сопротивления $F_{\text{гс}}$ действуют на площадь поверхности сечения пузырька воздуха $f_{\text{п}}$, а силы поверхностного натяжения – на поверхность раздела фаз пузырька воздуха $S_{\text{п}}$.

Поскольку при турбулентном всплывании пузырька воздуха устанавливается режим динамического равновесия сил, то выполняется условие $F_{\text{гс}} = F_{\text{Ар}} = F_{\text{пн}}$. По аналогии с выражением (9) имеем

$$A_{\text{Ар}} = A_{\text{гс}} = F_{\text{Ар}} v_{\text{п}} = W_{\text{п}} g (\rho - \rho_{\text{в}}) v_{\text{п}}; \quad (12)$$

$$A_{\text{пн}} = A_{\text{гс}} = F_{\text{пн}} v_{\text{п}} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{\text{п}} S_{\text{п}}^2}{W_{\text{п}}} v_{\text{п}} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{\text{п}}}{\delta_{\text{п}}} S_{\text{п}} v_{\text{п}}, \quad (13)$$

где $W_{\text{п}}$ – объем пузырька, м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³.

Тогда

$$S = \frac{A_{гс}}{E_{\Delta\sigma}} = W_{гс} g (\rho - \rho_{в}) v_{п} \cdot \frac{1}{\sigma_{п} S_{п}} = \frac{\delta_{п} v_{п} g (\rho - \rho_{в})}{\sigma_{п}} = \frac{d_{п} v_{п} g (\rho - \rho_{в})}{K_{д} \sigma_{п}}, \quad (14)$$

$$S = \frac{A_{мн}}{E_{\Delta\sigma}} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{п}}{\delta_{п}} S_{п} v_{п} \cdot \frac{1}{\sigma_{п} S_{п}} = \frac{2}{3} \frac{v_{п}}{\delta_{п}} = \frac{2}{3} K_{д} \frac{v_{п}}{\delta_{п}}, \quad (15)$$

где $\delta_{п} = \frac{W_{п}}{S_{п}}$ – эффективный дисперсный размер пузырька, м; $K_{д} = \frac{d_{п}}{\delta_{п}}$ – коэффициент дисперсности пузырька.

Таким образом, имеем систему уравнений

$$\begin{cases} S = \zeta \rho \frac{v_{п}^3}{2 \sigma_{п} K_{ф}} \\ S = \frac{d_{п} v_{п} g (\rho - \rho_{в})}{K_{д} \sigma_{п}} \\ S = \frac{2}{3} K_{д} \frac{v_{п}}{\delta_{п}} \end{cases} \quad (16)$$

Подставляя уравнение (15) в уравнение (5), имеем

$$\frac{dm}{dt} = A \sqrt{\frac{2}{3}} D_{тд} K_{д} \frac{v_{п}}{\delta_{п}} (C_{п} - C), \quad (17)$$

$$\frac{dm}{dt} = K_{L} A (C_{п} - C). \quad (18)$$

Формула (18) может описывать процессы массопередачи кислорода в жидкость при всех режимах всплывания пузырька воздуха. При ламинарном режиме всплывания псевдотвердого сферического пузырька воздуха ($d_{п} \leq 0,12$ мм) справедлива теория Льюиса-Уитмена, и в качестве коэффициента массопередачи жидкой пленки принимается коэффициент псевдостационарной диффузии K_{LC} . При движении сферического пузырька воздуха, сопровождающемся скольжением пристеночного слоя жидкости в ламинарном и переходном режимах ($0,12 \text{ мм} < d_{п} \leq 1,37$ мм), справедлива теория Хигби, и в качестве коэффициента массопередачи жидкой пленки принимается коэффициент нестационарной диффузии K_{Ln} .

Всплывание деформированного пузырька воздуха во всех турбулентных режимах ($d_{п} > 1,37$ мм) описывается теорией Данквертса, и в качестве коэффициента массопередачи жидкой пленки принимается коэффициент турбулентной диффузии $K_{Lт}$.

$$\begin{cases} K_{LC} = \frac{D_{сд}}{y} \\ K_{Ln} = \sqrt{\frac{4 D_{нд} v_{п}}{\pi d_{п}}} \\ K_{Lт} = \sqrt{\frac{2 D_{тд} v_{п}}{3 d_{п}}} \end{cases} \quad (19)$$

Численное значение коэффициента дисперсности $K_{д}$ в турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха в чистой воде может быть определено по формуле

$$K_{д} = 162, 2 d_{п}^{0,5}. \quad (20)$$

Подставляя в формулу (17) значение коэффициента турбулентной диффузии $D_{\text{ТД}}=0,3 \cdot 10^{-9}$ м²/с, можно определить величину скорости массопередачи и рассчитать технологические параметры системы аэрации.

Список литературы

1. Попкович, Г.С. Система аэрации сточных вод / Г.С. Попкович, Б.Н. Репин. – М.: Стройиздат, 2009.
2. Андреев, С.Ю. Теоретические основы процессов генерации динамических двухфазных систем вода-воздух и их использование в технологиях очистки воды / С.Ю. Андреев. – Пенза: ПГУАС, 2005.
3. Андреев, С.Ю. Совершенствование механической и биологической очистки городских сточных вод с использованием гидродинамических устройств / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин. – Пенза: ПГУАС, 2009.
4. Брагинский, Л.Н. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод / Л.Н. Брагинский, М.А. Евилевич. – Л.: Химия, 1980.
5. Dankwerst, P.V. Sidneficance of liquid – film cjefficients in gas absorption / P.V. Dankwerst // Industrial and Engineering chemistry. – 1951. – №6.

References

1. Popcovich, G.S. Waste water aeration system /G.S. Popcovich, B.N. Repin. – М.: СІРН, 2009.
2. Andreev, S.Yu. Theoretical basis of generation of dynamics biphase water – air processes systems and their use in water purification technologies / S.Yu. Andreev. – Penza: PSUAC 2005.
3. Andreev, S.Yu. Urban waste water mechanical and biological purification perfection with hydrodynamic devices application / S.Yu. Andreev, B.M. Grichin. – Penza: PSUAC 2009.
4. Braginsky, L.N. Air construction modeling for waste water purification / L.N. Braginsky, M.A. Evilevich. – L.: Chemistry 1980.
6. Dankwerst, P.V. Sidneficance of liquid – film cjefficients in gas absorption / P.V. Dankwerst // Industrial and Engineering chemistry. – 1951. – №6.

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
E-mail: vabereg@rambler.ru

Мальцев Алексей Викторович,
аспирант кафедры «Городское
строительство и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Дерина Мария Александровна,
аспирант кафедры «Городское
строительство и архитектура»
E-mail: gsia @ pguas.ru

Гречишкин Александр Викторович,
кандидат технических наук, доцент
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

Beregovoy Aleksandr Marcovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: vabereg@rambler.ru

Maltsev Alecsei Victorovitch,
Postgraduate of the department «Urban
construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Derina Marya Alecsandrovna,
Postgraduate of the department «Urban
construction and Architecture»
E-mail: gsia @ pguas.ru;

Grechishkin Alexandr Victorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: gsia@pguas.ru

ЭФФЕКТ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ ИНФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ НАРУЖНУЮ СТЕНУ

А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина, А.В. Гречишкин

На основании физико-математической модели экономайзерного эффекта в наружной стене дана приближенная оценка экономии тепловой энергии в помещении за счет уменьшения объема холодного приточного воздуха и количества тепла на его подогрев.

Ключевые слова: энергосбережение, естественная вентиляция, инфильтрация воздуха, экономайзерный эффект.

ENERGY SAVING EFFECT IN THE ROOM WITH NATURAL VENTILATION IN CONDITIONS OF AIR INFILTRATION THROUGH EXTERNAL WALL

A.M. Beregovoi, V.A. Maltsev, M.A. Derina, A.V. Grechishkin

Based on physicomathematical model of economizer's effect in external wall an approximate evaluation of heat economy is given due to reducing of cold air inflow and amount of heat on its temperature rise.

Keywords: energy savings, natural ventilation, air infiltration, economizer's effect.

Значимость любого исследования по созданию экологически чистых и эффективных по теплотехническим свойствам строительных материалов в немалой мере зависит от соответствия его результатов концептуальным основам создания «здорового» и энергоэффективного здания («healthy» and energy efficiency building). В последние годы ученым-материаловедам удалось значительно понизить плотность некоторых экологически чистых неорганических материалов (пеночеромабетоны, газо- и пенобетоны и др.), что позволило отнести их к классу энергоэффективных материалов.

При инфильтрации наружного воздуха с поверхности однородных ограждений из этих материалов в воздушную среду помещений не выделяются вредные для здоровья

продукты распада полимерных материалов в отличие от слоистых конструкций с использованием вспученных пластмасс. Такие наружные ограждения с упорядоченной капиллярно-пористой структурой представляют собой по сути «дышащие» конструкции, способствующие улучшению микроклимата помещений. К тому же они обладают способностью к самоочищению путем выноса агрессивных веществ в диффундирующем потоке водяного пара к наружной поверхности и затем в атмосферу.

Молярный перенос воздуха через толщу наружного ограждения к внутренней поверхности имеет все признаки гидродинамического потока в пористых средах. Он возникает при давлении наружного воздуха, превышающем давление внутреннего:

$$\Delta P = P_n - P_v.$$

При этом процесс инфильтрации воздуха усиливается с наветренной стороны здания, а также в нижних этажах из-за гравитационного давления за счет разности температур по высоте здания. В процессе противоточного движения теплового потока из отапливаемого помещения в пористой структуре ограждающей конструкции возникает экономайзерный эффект, при котором часть трансмиссионного тепла помещения передается встречному воздушному потоку. Оценка точной величины этого эффекта представляется сложной математической задачей, связанной с решением полной системы дифференциальных уравнений теплопереноса и определением потенциалов переноса тепла и массы.

Ниже рассмотрена упрощенная модель экономайзерного эффекта в процессе инфильтрации воздуха через пористое ограждение, позволяющая дать приближенную оценку эффекту энергосбережения в холодный период года. При этом были приняты следующие допущения.

1. Температура во всех сечениях ограждения практически равна температуре воздуха из-за очень медленного его движения через капиллярно-пористую структуру материала (в пределах 1,5...2,6 мм/с на каждый 1 м³ расхода воздуха через 1 м² конструкции в час).

2. В материале наружного ограждения содержится небольшое количество влаги в жидкой фазе, которое недостаточно для закупорки его пор и капилляр и которое не влияет на его воздухопроницаемость при малой разности давлений воздуха по обе стороны конструкции.

3. Содержание жидкости в порах материала велико по сравнению с содержанием пара и поэтому влияние конденсации водяного пара на тепло-массоперенос в процессе инфильтрации воздуха оказывается чрезвычайно малым.

Известно, что дифференциальное уравнение переноса тепла для одномерной задачи в отсутствие источников и стоков в стационарном состоянии при движении фильтрационного потока влажного воздуха имеет вид:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - w \cdot c_v \cdot \frac{dt}{dx} = 0, \quad (1)$$

где $t = A_1 \cdot \exp \cdot (c_v \cdot w / \lambda) \cdot x + A_2$.

Постоянные A_1 и A_2 находятся из граничных условий $t = t_n$ при $R = 0$; и $t = t_v$ при $R = R_0$, где R_0 и R – соответственно общее сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции и то же сопротивление без учета сопротивления внутренней поверхности ограждения, м²·°С/Вт.

После преобразований формулы (1) и с учетом граничных условий определяют температуру τ_v и тепловой поток q_v на внутренней поверхности ограждения при инфильтрации:

$$\tau_v = t_n + (t_v - t_n) \cdot \frac{e^{c_v \cdot w \cdot R} - 1}{e^{c_v \cdot w \cdot R_0} - 1}, \quad (2)$$

$$q_u = \frac{c_b \cdot w \cdot e^{c_b \cdot w \cdot R}}{e^{c_b \cdot w \cdot R_0} - 1} \cdot (t_b - t_n). \quad (3)$$

Тепловой поток q_u , входящий из помещения в ограждение, является расчетным при определении теплопотерь.

В формулах (2) и (3) t_n и t_b – наружная и внутренняя температура воздуха; c_b – удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг °С; w – расход воздуха, кг/м²·ч. Приближенное значение разницы давлений воздуха по обе стороны ограждения с наветренной стороны ниже нейтральной зоны здания определили по формуле [1]:

$$\Delta P = -0,8 \cdot \left[-g \cdot (\gamma_n - \gamma_b) \cdot H - 0,6 \frac{(0,6 \cdot v)^2 \cdot \gamma_n}{2} \right], \quad (4)$$

где H – расстояние по высоте от середины этажа до нейтральной зоны, м; v – расчетная скорость ветра, м/с.

В процессе вентиляции помещения на подогрев наружного холодного воздуха, компенсирующего расчетный расход воздуха $W_{\text{вент}}$, м³/ч, который удаляется из помещения вытяжной вентиляцией, затрачивается количество тепла, равное:

$$Q_{\text{вент}} = 0,28 \cdot w_{\text{вент}} \cdot \gamma_n \cdot c_b \cdot (t_b - t_n), \quad (5)$$

где для жилых зданий удельный расход воздуха нормируется в объеме 3 м³/ч на 1 м² площади помещения и кухни.

Подогретый при инфильтрации в результате экономайзерного эффекта воздух в количестве $w_{\text{вент}}$, кг/м²·ч, уменьшает как необходимое количество наружного воздуха в системе вентиляции здания на величину $\Delta w_{\text{вент}}$, кг/м²·ч, так и количество тепла на его подогрев:

$$\Delta Q_{\text{вент}} = 0,28 \cdot \Delta w_{\text{вент}} \cdot \gamma_n \cdot c_b \cdot (t_b - t_n). \quad (6)$$

Количество инфильтрующегося воздуха $w_{\text{инф}}$, кг/м²·ч, равно:

$$w_{\text{инф}} = \Delta P / \sum R_n, \quad (7)$$

где ΔP – разность давлений воздуха с внешней и внутренней стороны ограждения, Па; $\sum R_n$ – сумма сопротивлений воздухопроницанию всех слоев ограждения, м²·ч·Па / кг.

Поступающий с внутренней поверхности ограждения воздух будет иметь температуру, значительно превышающую температуру холодного приточного воздуха в системе естественной вентиляции, но ниже температуры внутреннего воздуха:

$$t_n < \tau_{\text{инф}} < t_b.$$

Можно полагать, что при большом количестве инфильтрующегося воздуха через пористую структуру наружного ограждения минимизируются тепло- вые потери помещения, так как уходящий тепловой поток через эту конструкцию в основном используется на нагрев наружного холодного воздуха. Учет такого эффекта «проветривания» через пористую структуру наружного ограждения позволяет экономить тепловую энергию в процессе вентиляции помещений наружным воздухом, который или забирает тепло внутренней воздушной среды, или может предварительно подогреваться в случае механической приточной системы.

Оценку экономайзерного эффекта проводили на примере помещения площадью 12 м², расположенного на первых этажах 2- и 12-этажных жилых домов, построенных по старым (до 1995 г.) нормам тепловой защиты зданий. Высота этажа 3 м, температура внутреннего и наружного воздуха соответственно 20 °С и – 29 °С, скорость ветра 5,6 м/с. Конструкция наружной стены площадью $S_{\text{ст}} = 8,8$ м² изготовлена из крупнопористого керамзитобетона плотностью 900 кг/м³ с внутренним отделочным слоем из листов сухой штукатурки, установленных с заделкой швов.

Сопротивление воздухопроницанию ограждения:

$$\sum R_{и} = R_{к} + R_{ш} = 15 + 20 = 35 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}.$$

Общее сопротивление теплопередаче:

$$R_o = 1/8,7 + 0,4/0,28 + 0,015/0,6 + 1/23 = 1,6 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Сопротивление теплопередаче ограждения на границе у внутренней поверхности:

$$R = R_o - 1/8,7 = 1,485 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Разность давлений воздуха с наветренной стороны:

2-этажный дом

$$\Delta P = -0,8\{ [-9,81(1,42 - 1,2)(0,7 \cdot 3 \cdot 2 - 1,5) - 0,6[(0,6 \cdot 5,6)^2 \cdot 1,42/2] \} = 8,51 \text{ Па};$$

12-этажный дом

$$\Delta P = -0,8\{ [-9,81(1,42 - 1,2)(0,7 \cdot 3 \cdot 12 - 1,5) - 4,81 \} = 44,77 \text{ Па}.$$

Количество инфильтрующегося воздуха:

$$\text{2-этажный дом } w_{инф} = 8,51 / 35 = 0,243 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$$

$$\text{или } 0,243 \cdot 8,8 = 2,14 \text{ кг/ч} = 2,14 / 1,42 = 1,51 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

$$\text{12-этажный дом } w_{инф} = 44,77 / 35 = 1,28 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$$

$$\text{или } 1,28 \cdot 8,8 = 12,56 \text{ кг/ч} = 12,56 / 1,42 = 7,93 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Температура внутренней поверхности ограждения:

$$\text{2-этажный дом } \tau_{в} = -29 + 49 \cdot (e^{0,28 \cdot 0,243 \cdot 1,485} - 1) / (e^{0,28 \cdot 0,243 \cdot 1,6} - 1) =$$

$$= -29 + 49 \cdot 0,92 = 16,16 \text{ °C};$$

$$\text{12-этажный дом } \tau_{в} = -29 + 49 \cdot (e^{0,28 \cdot 1,9 \cdot 1,485} - 1) / (e^{0,28 \cdot 1,9 \cdot 1,6} - 1) = 15,51 \text{ °C}.$$

Величина теплового потока на внутренней поверхности наружного ограждения при инфильтрации:

2-этажный дом

$$q_{инф} = [0,28 \cdot 0,243 \cdot e^{0,28 \cdot 0,243 \cdot 1,485} / (e^{0,28 \cdot 0,243 \cdot 1,485} - 1)] \cdot 49 = 31,03 \text{ Вт/м}^2;$$

12-этажный дом

$$q_{инф} = [0,28 \cdot 1,28 \cdot e^{0,28 \cdot 1,28 \cdot 1,485} / (e^{0,28 \cdot 1,28 \cdot 1,6} - 1)] \cdot 49 = 38,64 \text{ Вт/м}^2.$$

Та же величина при отсутствии инфильтрации:

$$q = (t_{в} - t_{н}) / R_o = 49 / 1,6 = 30,63 \text{ Вт/м}^2.$$

Дополнительные теплотери при наличии инфильтрации равны:

$$q_{доп} = q_{инф} - q$$

$$\text{2-этажный дом } q_{доп} = 31,03 - 30,63 = 0,4 \text{ Вт/м}^2;$$

$$\text{12-этажный дом } q_{доп} = 38,64 - 30,63 = 8,01 \text{ Вт/м}^2.$$

Расход тепла на подогрев необходимого количества вентиляционного воздуха:

$$Q_{вен} = 0,28 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 1,42 \cdot 49 = 701,37 \text{ Вт}.$$

Поступивший при инфильтрации через всю поверхность наружной стены объем воздуха уменьшает потребность помещения в вентиляционном воздухе на величину $\Delta w_{вен} = w_{вен} - w_{инф}$.

На подогрев поступившего при инфильтрации объема воздуха от температуры $t_{н} = -29 \text{ °C}$ до температуры $t_{в} = 20 \text{ °C}$ потребовалось бы следующее количество тепла, которое представляет собой величину сэкономленного тепла с учетом ряда поправок:

$$\text{2-этажный дом } Q_{w_{инф}} = 0,28 \cdot 1,51 \cdot 1,42(20 + 29) = 29,36 \text{ Вт};$$

$$\text{12-этажный дом } Q_{w_{инф}} = 0,28 \cdot 7,93 \cdot 1,42(20 + 29) = 154,50 \text{ Вт}.$$

Первую поправку введем как часть трансмиссионного тепла, затрачиваемого на обогрев инфильтрующегося воздуха в поровом пространстве конструкции:

$$Q_{w \text{ инф}}^{\text{In}} = q_{\text{доп}} \cdot S_{\text{ст}}$$

$$\text{2-этажный дом } Q_{w \text{ инф}}^{\text{In}} = 0,40 \cdot 8,8 = 3,52 \text{ Вт};$$

$$\text{12-этажный дом } Q_{w \text{ инф}}^{\text{In}} = 8,01 \cdot 8,8 = 70,40 \text{ Вт}.$$

Вторую поправку введем на дополнительное тепло, которое потребуется на подогрев инфильтрационного объема воздуха (имеющего температуру, равную температуре внутренней поверхности) до температуры воздуха помещения $t_{\text{в}}$:

$$\text{2-этажный дом } Q_{w \text{ инф}}^{2\text{n}} = 0,28 \cdot 1,51 \cdot 1,22 (20 - 16,16) = 1,98 \text{ Вт};$$

$$\text{12-этажный дом } Q_{w \text{ инф}}^{2\text{n}} = 0,28 \cdot 7,93 \cdot 1,22 (20 - 15,51) = 12,16 \text{ Вт},$$

где 1,22 – плотность воздуха при температурах внутренней поверхности $\tau_{\text{в}} = 16,16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $15,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Тогда с учетом двух поправок расход тепла на нагревание необходимого объема воздуха в данном помещении составит:

$$\text{2-этажный дом } Q_0 = 701,37 - 29,36 + 3,52 + 1,98 = 677,51 \text{ Вт};$$

$$\text{12-этажный дом } Q_0 = 701,37 - 154,50 + 70,40 + 12,16 = 629,43 \text{ Вт}.$$

Приближенный эффект экономии тепла при инфильтрации воздуха через данное ограждение будет равен:

$$\text{2-этажный дом } (701,37 - 677,51) \cdot 100 / 701,37 = 3,40 \%;$$

$$\text{12-этажный дом } (701,37 - 629,43) \cdot 100 / 701,37 = 10,26 \%.$$

Как видим, экономайзерный эффект повышается с увеличением высоты здания, а также с уменьшением сопротивления воздухопроницанию $R_{\text{н}}$ ограждения. Однако при большой величине $R_{\text{н}}$ ($490 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}$) для упомянутой выше конструкции наружной стены из керамзитобетона плотностью 1100 кг/м^3 этот эффект практически неощутим (около 1 %) даже в 12-этажном доме.

Результаты аналогичных расчетов, выполненных для конструкций наружных стен из шлакопемзобетона и кирпичной кладки на цементно-шлаковом растворе с тем же внутренним отделочным слоем, показали, что данный эффект может составить 18 % и 13 % соответственно.

Список литературы

1. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания / К.Ф. Фокин; под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. – 5 изд., испр. – М.: АВОК- ПРЕСС, 2006. – 256 с.

References

1. Fokin, K.F. Thermal Engineering of enclosing parts of the building / K.F. Fokin; under red. Yu.A. Tabunschicova, V.G. Gagarina. – 5 ed. the revision. – М.: AVOKPRESS, 2006. – 256 p.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Титова, д. 28, тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук, профессор
кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Грейсх Григорий Исаевич,
доктор технических наук, профессор, зав.
кафедрой «Физика и химия»

Степанов Сергей Алексеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Физика и химия»

Ивашенко Никита Юрьевич,
студент
E-mail: tgv@pguas.ru

Penza State University of Architecture and Construction

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

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of econom sciences, Professor of
the department «Heating, gas supply and
ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Greisukh Gregory Isaevich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Physics and Chemistry»

Stepanov Sergey Alecseevich,
Doctor of Physics and Mathematics, Professor
of the department «Physics and Chemistry»

Ivashchenko Nikita Yurievich,
student
E-mail: tgv@pguas.ru

НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА В ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ (НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ)

Т.И. Королева, Г.И. Грейсх, С.А. Степанов, Н.Ю. Ивашенко

Рассмотрены вопросы энергосбережения путем использования тепла солнечной радиации для горячего водоснабжения.

Ключевые слова: солнечная энергетика, автоматизированная водонагревательная установка, оценка экономии тепловой энергии.

ALTERNATIVE ENERGY IN HEAT SUPPLY (ON THE EXAMPLE OF PENZA REGION)

T.I. Koroleva, G.I. Greisukh, S.A. Stepanov, N.Y. Ivashchenko

The problems of energy saving due to the use of solar radiation for domestic hot water are examined.

Keywords: solar power, solar water heater, heat savings.

В условиях экономического кризиса энергосбережение становится приоритетной государственной задачей, т.к. позволяет простыми мерами государственного регулирования значительно снизить нагрузку на бюджеты всех уровней и сдерживать рост энергетических тарифов.

Энергосбережение отнесено к стратегическим задачам государства. Требуемые для внутреннего развития энергоресурсы можно получить не только за счет увеличения добычи сырья в труднодоступных районах, но и за счет энергосбережения непосредственно в центрах потребления [1].

Одним из перспективных направлений энергосбережения является применение солнечной энергии в теплоснабжении.

В основе солнечной энергетики – неисчерпаемый источник энергии, она является экологически чистой, то есть не производящей вредных отходов.

Объем неэффективного использования энергии в России в настоящее время равен годовому потреблению первичной энергии во Франции.

Энергосберегающие технологии в России имеют хорошие перспективы. Чтобы убедиться в этом, достаточно обратить внимание, например, на ключевой принцип строительства некоторых объектов в Пензенской области.

В России солнечные коллекторы применялись достаточно редко, поскольку при их установке в первую очередь учитывают погодные-климатические условия местности. Если использование солнечных коллекторов является эффективным решением для ряда европейских стран, то в северных регионах России их установка нецелесообразна и не окупится даже за 10–15 лет. Напротив, в южных областях срок их окупаемости значительно сокращается и может достигать всего 3 года.

Опыт показывает, что солнечные системы для нагрева горячей воды должны быть как можно более простыми и не слишком большими. Например, на семью из 4 человек, которая потребляет 200 литров горячей воды в день, нужен коллектор площадью 6 м². В год такая система вырабатывает до 3000 кВт·ч экологически чистой энергии. В случае, если коллектором заменяют мазутный котел, экономия мазута составляет, по меньшей мере, 300 литров в год [2, 3, 5].

Продолжительность дня, а следовательно, и возможная продолжительность солнечного сияния, наименьшая в декабре и наибольшая в июне. 22 декабря продолжительность дня равна 7 ч 18 мин, а 22 июня 16 ч 44 мин. Начиная с 22 декабря продолжительность дня плавно нарастает от дня ко дню до 22 июня, а затем также плавно убывает до 22 декабря. В среднем за год в Пензе солнце светит 1807 ч, что составляет 46 % от теоретически возможной продолжительности.

Наибольшее число часов солнечного сияния наблюдается в июне и июле, когда относительная продолжительность составляет 61–63 %. В ноябре-январе относительная продолжительность составляет всего 18–21 %. В эти месяцы отмечается 16–20 дней без солнца.

В городских условиях из-за затенения высокими зданиями в утренние и вечерние часы число часов солнечного сияния несколько уменьшается по сравнению с открытой местностью.

Для годового хода суммарной радиации наблюдается нарастание месячных сумм от февраля к марту, что объясняется увеличением высоты солнца и продолжительности дня, уменьшением облачных дней и высокой прозрачностью атмосферы в марте. Приток суммарной радиации за месяц при средних условиях облачности значительно ниже возможных сумм (т.е. сумм при безоблачном небе) и составляет 44–75 %. В летние месяцы наименьшая разница между действительными и возможными суммами суммарной радиации составляет 25 %. В декабре земная поверхность недополучает 56 % суммарной радиации, а за год – 33 %.

При средних условиях облачности общий ход радиационного баланса сохраняется таким же, как и при безоблачном небе, но абсолютные значения меньше. В годовом ходе радиационного баланса наибольшие значения отмечаются в июне, наименьшие – в декабре и январе; годовая сумма положительная и составляет 1600,5 МДж/м².

С ноября по март радиационный баланс отрицателен. Переход от отрицательного значения к положительному происходит между второй декадой февраля и второй декадой марта, обратный переход от положительного значения к отрицательному – в первой-второй декаде ноября. Резкое увеличение сумм радиационного баланса весной (апрель) связано с таянием и сходом снежного покрова (альbedo подстилающей поверхности влияет на радиационный баланс в среднем больше, чем облачность) [4].

На основе этих данных авторы пришли к выводу, что климатические условия Пензенской области позволяют произвести установку солнечных коллекторов, более того, она является целесообразной и экономически выгодной.

Рассмотрим объекты, на которых уже установлены солнечные установки.

Для типичного жилого дома или квартиры в Пензенской области нагрев воды – это второй по энергоемкости домашний процесс. Для ряда домов он даже является самым энергоемким. Использование энергии солнца способно значительно снизить стоимость бытового нагрева воды. Солнечный коллектор предварительно подогревает воду, которая затем подается на традиционную колонку или бойлер, где вода нагревается до нужной температуры. Это приводит к значительной экономии средств, и к тому же такую систему легко установить. Она почти не требует ухода. Даже в регионах с относительно небольшим количеством солнечной радиации солнечная система может

обеспечить 50-70 % потребности в горячей воде. В Пензенской области уже установлены солнечные нагревательные системы для больницы и плавательного бассейна села Бессоновка [5, 6].

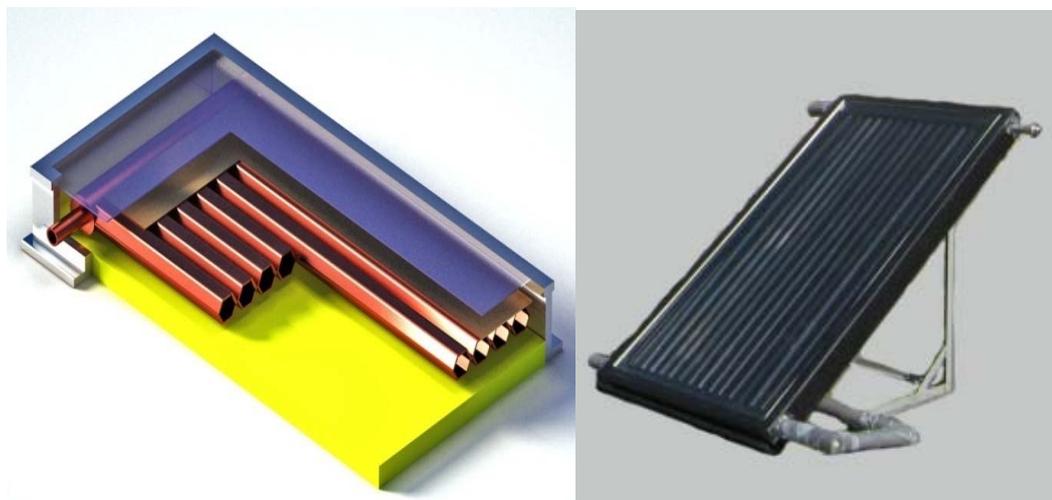
Представители малого инновационного предприятия «ИНТЭН», созданного учеными Пензенской государственной технологической академии, и ОАО «Нижнеломовский электромеханический завод» начали серийное производство солнечных коллекторов, разработанных в ПГТА.

В отличие от солнечных батарей, производящих электричество, солнечный коллектор производит нагрев материала-теплоносителя.

Типовая солнечная водонагревательная установка состоит из одного или нескольких солнечных коллекторов ИНТЭН и теплообменника-аккумулятора. Через солнечный коллектор циркулирует теплоноситель (антифриз). Теплоноситель нагревается в солнечном коллекторе энергией солнца и отдает затем тепловую энергию воде через теплообменник, вмонтированный в бак-аккумулятор. В баке-аккумуляторе хранится горячая вода до момента ее использования, поэтому он должен иметь хорошую теплоизоляцию. В первом контуре, где расположен солнечный коллектор, может использоваться естественная или принудительная циркуляция теплоносителя.

В базовой модели солнечного коллектора ИНТЭН-1 прозрачная теплоизоляция выполнена из специального антивандального закаленного стекла с малым процентом содержания железа. Теплопоглощающая панель коллектора выполнена из металла с высокой теплопроводностью с черным покрытием. Для теплоизоляции применяются современные эффективные материалы.

В результате применения оригинальных конструкторских решений и использования высокотехнологичных материалов удалось поднять КПД коллекторов до 75 %, что было подтверждено испытанием опытных образцов на реальных объектах Пензенской области (см. рисунок) и независимой экспертизой.



Солнечный плоский коллектор «ИНТЭН» (патент РФ № RU 96637 U1)

Коллектор ИНТЭН площадью 1,1 м² имеет размеры 1500×750×95 мм. Он состоит из алюминиевой рамы и закаленного стекла с уплотнением из EPDM (этиленпропиленовый каучук). Поглотитель состоит из двух пластин из нержавеющей стали, соединенных методом контактной сварки и покрытых черным хромом. Испытания показали, что три коллектора ИНТЭН способны нагреть 200 литров до температуры 55 °С от 3 до 3,5 часов в летний период с апреля по октябрь. Цена новых солнечных коллекторов для конечного потребителя составляет примерно 12–15 тыс. руб. за штуку. Место установки: стационарное отделение центральной районной больницы с. Бессоновка Пензенской области.

В больнице с. Бессоновка горячую воду получают за счет нагрева холодной воды в двух электрических водонагревательных установках (бойлерах), имеющих баки

объемом по 500 л каждый. Для регистрации потребления электроэнергии и воды на каждом бойлере установлены электросчетчик и счетчик расхода воды.

Один из бойлеров работает в штатном режиме и вода в нем подогревается теплоэлектронагревателем, другой также работает в штатном режиме, но нагрев воды в нем в настоящее время осуществляется комбинированным способом: теплоэлектронагревателем и солнечной автоматизированной водонагревательной установкой.

Назначение солнечной водонагревательной установки – обеспечить нагрев воды за счет энергии солнца, обеспечив при этом экономию электроэнергии.

Величина экономии электроэнергии определялась опытным путем в течение трех летних месяцев. Снижение ошибки измерений обеспечивалось:

- за счет создания одинаковых условий функционирования для обоих бойлеров;
- за счет использования одинаковых аттестованных приборов.

Показания счетчиков воды и электроэнергии за период 5.06 – 5.09.2012 г. представлены в таблице.

Дата	Показания приборов учета по схеме с солнечным коллектором		Показания приборов учета по схеме без солнечного коллектора	
	Вода, м ³ /ч	Электроэнергия, кВт/ч	Вода, м ³ /ч	Электроэнергия, кВт/ч
5.06.2012	1171	53866	301	18727
5.07.2012	1255	57718	332	20651
5.08.2012	1339	61582	368	22232
5.09.2012	11434	65997	392	24404

Среднемесячный расход воды по схеме с солнечным коллектором – 87,7 м³, без солнечного коллектора – 30,3 м³.

Среднемесячный расход электроэнергии по схеме с солнечным коллектором равен 4043,7 кВт/ч, без солнечного коллектора – 1892,3 кВт/ч.

Средний удельный расход электроэнергии за 1 месяц по схеме с солнечным коллектором равен 46,1 кВт ч/м³, без солнечного коллектора – 62,5 кВт ч/м³.

Экономия электроэнергии по удельным расходам составит:

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = 62,5 - 46,1 = 16,4 \text{ кВт ч/м}^3.$$

При расходе воды за август 2012 г. около 95 м³ экономия электроэнергии в натуральном выражении составит:

$$\mathcal{E}_{\text{к}} = 95 \times 16,4 = 1558 \text{ кВт/ч.}$$

При существующих тарифах на электрическую энергию в г. Пензе экономия за август по стоимости составит:

$$\mathcal{E}_{\text{к}} = 1558 \times 3,80 = 5920,4 \text{ руб.}$$

В результате экономический эффект от внедрения такого энергосберегающего мероприятия в денежном выражении за 7 месяцев без отопительного периода составит 41442,8 руб.

В Пензенской области благоприятные климатические условия для использования солнечных коллекторов, и если произвести их установку хотя бы в муниципальных учреждениях, то экономия топлива составит около 20 %, что является очень хорошим результатом для нашего региона. Высокая эффективность использования энергоресурсов позволит также значительно увеличить экологичность здания, так как снижение объема сожженного газа уменьшит выход продуктов сгорания, а в летнее время благодаря использованию чистой солнечной энергии будет исключено их образование.

Список литературы

1. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Журнал АВОК. – 2006. – №3.
3. Харченко, Н.В. Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко. – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 208 с.
4. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Р.Р. Аvezов [и др.]; под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990. – 328 с.
5. Альтернативные природные источники энергии в строительном проектировании / пер. с англ. А.С. Гусева; под ред. Э.В. Сарнацкого. – М.: Стройиздат, 1983. – 190 с.
6. Еремкин, А.И. Отопление и вентиляция жилого здания / А.И. Еремкин, Т.И. Королева. – М.: АСВ, 2010.

References

1. Federal Law 23.11.2009 № 261-FZ «On energy saving and energy efficiency improvements and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation».
2. Journal AVOK. – 2006. – № 3.
3. Kharchenko, N.V. Individual solar installation / N.V. Kharchenko. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 208 p.
4. System for solar heat and cold supply / R.R. Avezov [and others]; ed. E.V. Sarnatsky and S. Chistovich . – M.: Sroyizdat, 1990. – 328 p.
5. Alternative natural energy sources in building design / per. from English. A. Gusev, ed. E.V. Sarnatsky. – M.: Sroyizdat, 1983. – 190 p.
6. Eremkin, A.I. Heating and ventilation of residential buildings / A.I. Eremkin, T.I. Koroleva. – M.: DIA Publishing, 2010.

Московский государственный
машиностроительный университет

Россия, 107023, Москва,
ул. Большая Семеновская, 38,
тел.: 8 (495) 223-05-23

Будылина Евгения Александровна
кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель кафедры
«Информационные системы и
дистанционные 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 State University of mechanical
engineering

Russia, 107023, Moscow, 38,
Bolshay Semenovskaya St.,
tel.: 8 (495) 223-05-23

Budylna Evgeniya Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Senior lector of the department
«Informational systems and distance
technology»
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

ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ НАСТРОЙКЕ ИМИТАТОРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

Рассматриваются приближенные методы декомпозиции динамических систем, ориентированные на использование подсистем не более четвертого порядка с возможностью физической интерпретации параметров модели. Приводятся примеры.

Ключевые слова: динамические системы, декомпозиция, приближенные методы, настройка имитаторов.

APPROXIMATE METHODS OF DECOMPOSITION AT DYNAMIC SYSTEMS SIMULATORS CONFIGURATION

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

The authors consider approximate decomposition methods of dynamical systems, focused on the use of subsystems up to the fourth order with the possibility of physical interpretation of the model parameters. Examples are given.

Keywords: dynamic systems, decomposition, approximate method, setting simulators.

Современный уровень развития вычислительной техники позволяет решить большинство вопросов математического моделирования систем с использованием численных методов. Однако настройка имитаторов динамических систем требует интерпретации смысла параметров, входящих в модели [1] (в большинстве случаев приближенно и на основе интуиции исследователя).

Подход проиллюстрируем на примере систем четвертого порядка с характеристическим многочленом

$$P_4(x) = x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0.$$

Разложив по степеням $(x - \alpha)$, будем иметь:

$$P_4(x) = p_4(\alpha) + p_4'(\alpha)(x - \alpha) + \frac{1}{2}p_4''(\alpha)(x - \alpha)^2 + \frac{1}{6}p_4'''(\alpha)(x - \alpha)^3 + (x - \alpha)^4.$$

Выберем α из условия $p_4'''(\alpha) = 0$, получим $\alpha = -\frac{a_3}{4}$.

Тогда:

$$P_4(z) = z^4 + pz^2 + qz + r; \quad z = x + \frac{a_3}{4},$$

$$p = a_2 - \frac{3}{8}a_3^2, \quad q = a_1 - \frac{a_2a_3}{2} + \frac{a_3^3}{8}, \quad r = a_0 - \frac{a_1a_3}{4} + \frac{a_2a_3^2}{16} - \frac{3a_3^4}{256}. \quad (1)$$

Такое представление $P_4(z)$ удобно при графическом определении действительных корней (или установлении их отсутствия).

При $p \neq 0$ имеем:

$$z^4 + pz^2 + qz + r = z^4 + p\left(z + \frac{q}{2p}\right)^2 + r - \frac{q^2}{4p} = \left(x + \frac{a_3}{4}\right)^4 + p(x + \beta)^2 + S,$$

$$p = a_2 - \frac{3}{8}a_3^2, \quad q = a_1 - \frac{a_2a_3}{2} + \frac{a_3^3}{8}, \quad r = a_0 - \frac{a_1a_3}{4} + \frac{a_2a_3^2}{16} - \frac{3a_3^4}{256};$$

$$\beta = \frac{a_3}{4} + \frac{q}{2p}, \quad S = r - \frac{q^2}{4p}.$$

Исходя из (1), рассмотрим декомпозицию:

$$z^4 + pz^2 + qz + r = (z^2 + bz + \gamma)\left(z^2 - bz + \frac{r}{\gamma}\right). \quad (2)$$

Будем полагать $q \neq 0$; в противном случае легко определяются все четыре корня, как и в случае $r = 0$. Сравнивая коэффициенты многочленов слева и справа в (2), получим систему уравнений для определения b и γ :

$$b = q \frac{\gamma}{r - \gamma^2}, \quad f_2(\gamma) = f_1(\gamma)$$

$$(f_1(\gamma) = \gamma + \frac{r}{\gamma}, \quad f_2(\gamma) = p + q^2 \frac{\gamma^2}{(r - \gamma^2)^2}). \quad (3)$$

Алгоритм вычисления γ непосредственно вытекает из вида графиков функций $f_1(\gamma)$ и $f_2(\gamma)$ (рис.1, 2). Функция $f_1(\gamma)$ имеет вертикальную асимптоту $\gamma = 0$ и наклонную $y = \gamma$. Функция $f_2(\gamma)$ при $r > 0$ имеет вертикальную асимптоту $\gamma = \pm\sqrt{r}$ и горизонтальную $y = p$, а при $r < 0$ есть только горизонтальная асимптота $y = p$.

$$f_{1\max} = f_1(\sqrt{r}) = 2\sqrt{r}, \quad f_{1\min} = f_1(-\sqrt{r}) = -2\sqrt{r}, \quad r > 0;$$

$$f_{2\max} = f_2(\pm\sqrt{-r}) = p - \frac{q^2}{4r}, \quad r < 0.$$

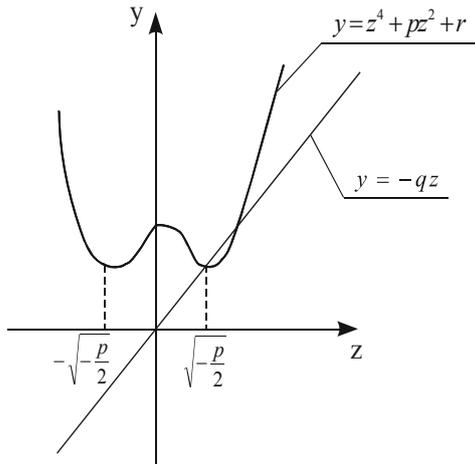


Рис. 1. Иллюстрация к графо-аналитическому определению корней многочлена $P_4(z)$, ($p, q < 0, r > 0$)

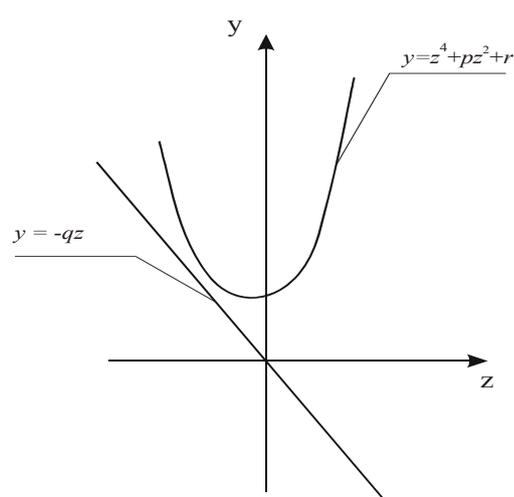


Рис. 2. Иллюстрация к графо-аналитическому определению корней многочлена $P_4(z)$, ($p, q, r > 0$)

При графо-аналитическом определении γ корень уравнения $f_1(\gamma) = f_2(\gamma)$ (рис. 3, 4) будем искать в одном из видов:

$$\gamma = \alpha\sqrt{r}, \text{ если } r > 0 \quad (0 < \alpha < 1);$$

$$\gamma = \alpha\sqrt{-r}, \text{ если } r < 0 \text{ и } p < \frac{q^2}{4r} \quad (0 < \alpha < 1); \tag{4}$$

$$\gamma = -\alpha\sqrt{-r}, \text{ если } r < 0 \text{ и } p > \frac{q^2}{4r} \quad (0 < \alpha < 1).$$

При $r < 0, p = \frac{q^2}{4r}$ непосредственной проверкой можно убедиться: $\gamma = \pm\sqrt{-r}$.

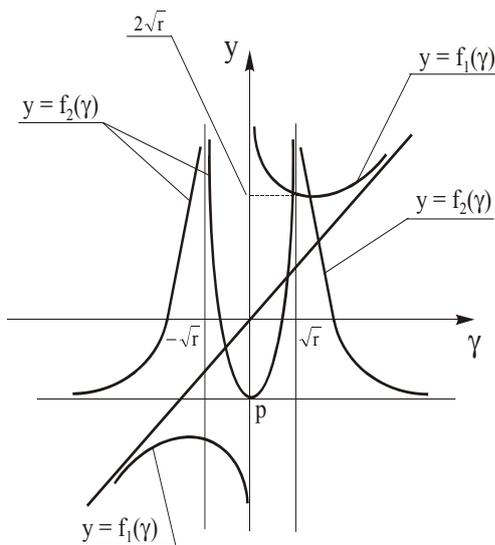


Рис.3. Зависимости $f_1(\gamma), f_2(\gamma)$ при $r > 0$

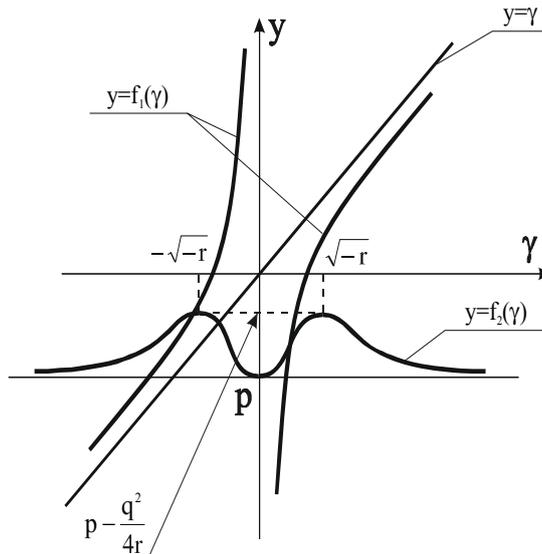


Рис. 4. Зависимости $f_1(\gamma), f_2(\gamma)$ при $r < 0$

Введем в рассмотрение функции:

$$g_1(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\pm r}} f_1(\pm\alpha\sqrt{\pm r}) \quad \text{и} \quad g_2(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\pm r}} f_2(\pm\alpha\sqrt{\pm r}),$$

где знаки выбираются в соответствии с (4); $\alpha \in (0, 1)$.

При $r > 0$ получим:

$$g_1(\alpha) = \frac{1+\alpha^2}{\alpha}; \quad g_2(\alpha) = p_r + q_r \frac{\alpha^2}{(1-\alpha^2)^2}, \quad p_r = \frac{p}{\sqrt{r}}, \quad q_r = \frac{q^2}{r\sqrt{r}}. \quad (5)$$

При $r < 0$ и $p_r < \frac{q_r}{4}$ $\left(p_r = \frac{p}{\sqrt{-r}}, \quad q_r = \frac{q^2}{r\sqrt{-r}}, \quad q_r < 0 \right)$

$$g_1(\alpha) = \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha}, \quad g_2(\alpha) = p_r + q_r \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)^2}. \quad (6)$$

При $r < 0$ и $p_r > \frac{q_r}{4}$ $\left(p_r = \frac{p}{\sqrt{-r}}, \quad q_r = \frac{q^2}{r\sqrt{-r}}, \quad q_r < 0 \right)$

$$g_1(\alpha) = \frac{1-\alpha^2}{\alpha}, \quad g_2(\alpha) = p_r + q_r \frac{\alpha^2}{(1+\alpha^2)^2}. \quad (7)$$

Соответствующие графики функций $g_1(\alpha)$ и $g_2(\alpha)$ представлены на рис. 5, 6, 7.

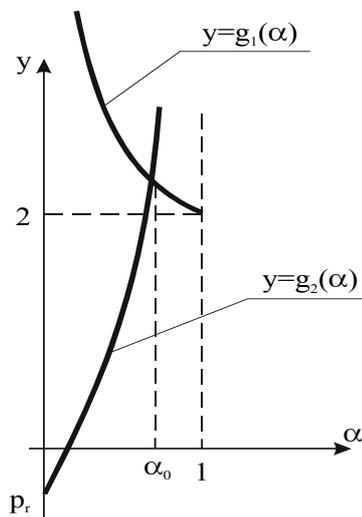


Рис. 5. Функции $g_1(\alpha)$ и $g_2(\alpha)$ при $r > 0$

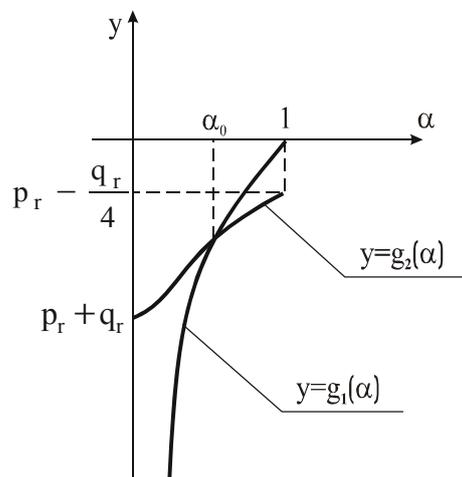


Рис. 6. Функции $g_1(\alpha)$ и $g_2(\alpha)$ при $r < 0$ и $p_r < \frac{q_r}{4}$

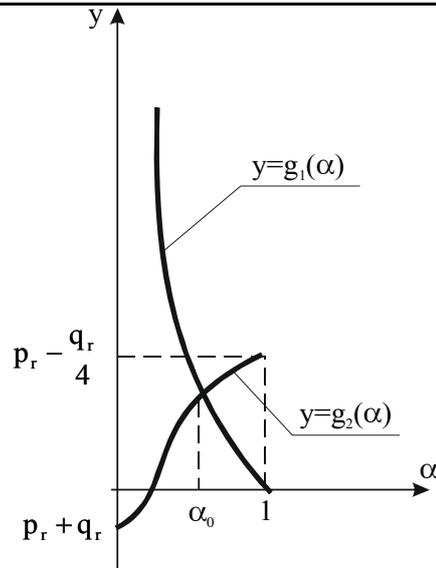


Рис.7. Функции $g_1(\alpha)$ и $g_2(\alpha)$ при $r < 0$ и $p_r > \frac{q_r}{4}$

В соответствии с предыдущим получим следующий алгоритм определения γ :

- построение графиков функций $y = g_1(\alpha)$, $y = g_2(\alpha)$;
- определение абсциссы α_0 пересечения графиков этих функций;
- определение γ_0 в соответствии с (4).

Для уточнения значения γ можно воспользоваться линейной или квадратичной аппроксимацией функции $f(\gamma) = f_2(\gamma) - f_1(\gamma)$ в окрестности точки γ_0 :

$$f(\gamma) \approx f(\gamma_0) + f'(\gamma_0)(\gamma - \gamma_0) + \frac{f''(\gamma_0)}{2}(\gamma - \gamma_0)^2. \quad (8)$$

Имеем:

$$\begin{aligned} f(\gamma) = f_2(\gamma) - f_1(\gamma) &= p + q^2 \frac{\gamma^2}{(r - \gamma^2)^2} - \left(\gamma + \frac{r}{\gamma} \right) = \\ &= p + q^2 \frac{\gamma_0^2}{(r - \gamma_0^2)^2} - \frac{\gamma_0^2 + r}{\gamma_0} + \left(2q^2 \frac{\gamma_0(\gamma_0^2 + r)}{(r - \gamma_0^2)^3} - \frac{r - \gamma_0^2}{\gamma_0^2} \right) (\gamma - \gamma_0) + \\ &+ \left(q^2 \frac{3(r + \gamma_0^2)^2 - 2r(r - \gamma_0^2)}{(r - \gamma_0^2)^4} - \frac{r}{\gamma_0^3} \right) (\gamma - \gamma_0)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

При уточнении γ методом частичной линейной аппроксимации функцию $f_1(\gamma) = \gamma + \frac{r}{\gamma}$ оставим без изменения (в силу ее простоты), а $f_2(\gamma)$ заменим линейной аппроксимацией. Получим квадратичное уравнение для определения γ :

$$p + q^2 \frac{\gamma_0^2}{(r - \gamma_0^2)^2} + 2q^2 \frac{\gamma_0(\gamma_0^2 + r)}{(r - \gamma_0^2)^3} (\gamma - \gamma_0) = \gamma + \frac{r}{\gamma}.$$

С увеличением порядка системы интерпретация результатов значительно затрудняется. В связи с этим при идентификации систем большего порядка целесообразно использование подсистем порядка, не превышающего 4.

В качестве иллюстрации рассмотрим характеристический многочлен

$$x^4 + 1,48x^3 - 6,46x^2 - 7,7x + 0,087$$

для объекта с параметрами по таблице 2 в [2] для случая $M = 0,9$, $h = 12$ км, или

$$z^4 - 7,26z^2 - 2,56z + 2,04, \quad z = x + 0,37, \quad \left(z = x + \frac{a_3}{4} \right).$$

Значения $g_1(\alpha)$, $g_2(\alpha)$ указаны в таблице.

α	$g_1(\alpha)$	$g_2(\alpha)$
0	-	3,8
0,2	5,2	3,88
0,3	3,63	4,01
0,27	3,97	3,95

Построив графики функций $y = 2,56z$, $y = z^4 - 7,26z^2 + 2,04$, убеждаемся, что все корни многочлена действительные (рис. 8).

$$z_1 = -2,41, \quad z_2 = -0,781, \quad z_3 = 0,381, \quad z_4 = 2,81.$$

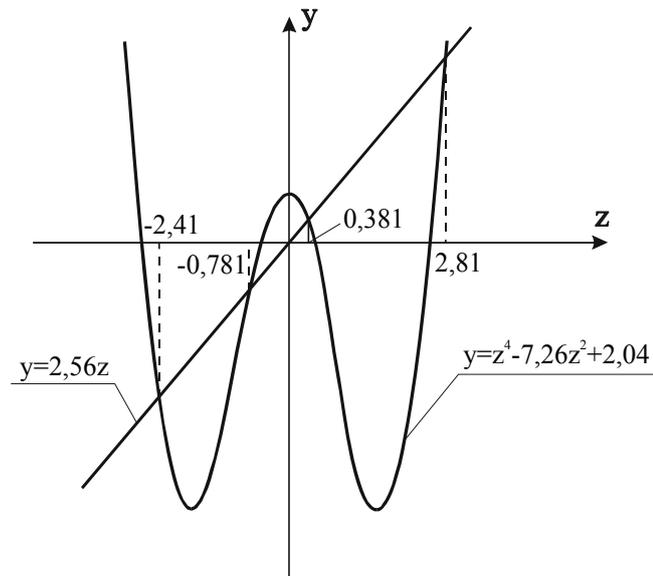


Рис. 8. Иллюстрация к декомпозиции динамической системы

Соответственно

$$x_1 = -2,78, \quad x_2 = -1,151, \quad x_3 = 0,011, \quad x_4 = 2,44.$$

Декомпозиция полинома представится в виде

$$z^4 - 7,26z^2 - 2,56z + 2,04 = (z^2 - 3,26z + 1,088)(z^2 + 3,26z + 1,875).$$

Решая квадратичные уравнения с точностью до 10^{-2} , получим те же корни z_i и соответственно x_i .

Рассмотренный подход успешно использовался при идентификации параметров кинетических процессов формирования физико-механических характеристик полидисперсных материалов [3].

Список литературы

1. Данилов, А.М. Математическое моделирование управляющих воздействий оператора в эргатической системе / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Э.Р. Домке // Вестник МАДИ. – 2011. – №2. – С.18–23.
2. Красовский, А.А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А.А. Красовский, Ю.А. Вавилов, А.И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. – 479 с.
3. Системный анализ в строительном материаловедении: моногр. / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.

References

1. Danilov, A.M. Mathematical modeling of the control actions of the operator in ergatic system / A.M. Danilov, I.A. Garkina, E.R. Domke // Herald MADI. – 2011. – № 2. – P.18–23.
2. Krasovskii, A.A. The automatic control systems of the aircraft / A.A. Krasovskii, Y.A. Vavilov, A.I. Suchkov. – M.: The air force engineering academy named N.E.Zhukovsky, 1986. – 479 p.
3. Systems analysis in building materials: monograph / Yu.M. Bazhenov. I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: Moscow State University of Civil Engineering: Library of scientific developments and projects, 2012. – 432 p.

УДК 621.928.9

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет
Россия, 400074, г. Волгоград,
ул. Академическая, д. 1,
тел.: (8442) 96-99-78; факс: (8442) 96-99-78

Боровков Дмитрий Павлович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Безопасность жизнедеятельности
в техносфере»

Бурба Иван Владимирович,
аспирант кафедры «Безопасность
жизнедеятельности в техносфере»
*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

Чичиров Константин Олегович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

*Volgograd state university of architecture and
building*

Russia, 400074, Volgograd, 1,
Akademicheskaya St.,
tel.: (8442) 96-99-78; fax: (8442) 96-99-78

Borovkov Dmitry Pavlovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Safety in Technosphere»

Burba Ivan Vladimirovich,
Postgraduate of the department «Safety in
Technosphere»

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Chichirov Konstantin Olegovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Heat and gas supply»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ НА ВСТРЕЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ

Д.П. Боровков, И.В. Бурба, К.О. Чичиров

Представлена кинематическая структура течения закрученного потока в сепарационной камере пылеуловителей ВЗП. Определены оптимальные значения характеристик первичного ввода пылеуловителя серии ВИП.

Ключевые слова: пылеуловитель, встречные закрученные потоки, эффективность, аэродинамическое сопротивление.

EFFICIENCY PRECIPITATORS AT COUNTER CORKSCREW FLOW

D.P. Borovkov, I.V. Burba, K.O. Chichirov

Kinematic structure of swirling stream flow in separation chamber of dust collectors is given. Optimal characteristic values of VIP series dust collector primary input are determined.

Keywords: dust collector, counter swirling flows, efficiency, pressure drop.

На предприятиях строительной индустрии в качестве пылеулавливающих средств сухой очистки получили широкое распространение вихревые пылеуловители на встречных закрученных потоках (ВЗП) [1]. Их внедрение обусловлено рядом преимуществ по сравнению с циклонными: более высокой степенью улавливания мелкодисперсной пыли; меньшей чувствительностью фракционной эффективности к колебаниям расхода газа и концентрации пыли в нем; меньшей степенью абразивного износа аппарата; большей удельной производительностью; возможностью более эффективной очистки горячих газов и регулирования процесса пылеулавливания изменением соотношений расходов газа через потоки; в некоторых случаях – меньшей затратностью. Вышеперечисленное делает задачу изучения и оптимизации пылеуловителей на встречных закрученных потоках актуальной.

В ходе анализа различных типов пылеуловителей ВЗП установлено, что за основу при их проектировании брались типовые пылеуловители циклонного типа [1, 2]. Однако ввиду наличия вторичного закрученного потока структура течения пылега-

зового потока в сепарационной камере пылеуловителей ВЗП отличается от таковой в пылеуловителях циклонного типа.

Данный факт дает основание предположить, что конструктивные характеристики пылеуловителей ВЗП, необходимые для обеспечения наибольших значений эффективности пылеулавливания, такие, как интенсивность закрутки потока, создаваемая первичным тангенциальным вводом, высота сепарационной камеры, параметры выходного патрубка и т.д., должны отличаться от соответствующих значений данных параметров, характерных для циклонов.

Для определения конструктивных характеристик первичного тангенциального ввода пылеуловителей на встречных закрученных потоках, позволяющих обеспечить максимальные значения эффективности пылеулавливания, составлена расчетная модель, описывающая движение пылевой частицы в пристеночной зоне сепарационной камеры.

Анализ экспериментальных результатов определения окружной и осевой составляющих скоростей газового потока в пристенной зоне сепарационной камеры позволяет сделать предположение об автомодельности кинематической структуры течения в пристенной зоне по отношению к начальному значению интенсивности закрутки потока Φ^*_0 . Для получения данных о параметрах пристеночного течения в пылеуловителях на встречных закрученных потоках были проведены экспериментальные исследования. Все результаты, полученные при различных значениях Φ^*_0 , ложатся на гладкую кривую (рис. 1). Аналогичная картина наблюдается с отношением начального значения окружной составляющей скорости к значениям, полученным в ходе измерений по высоте сепарационной камеры U_r/U_{r0} .

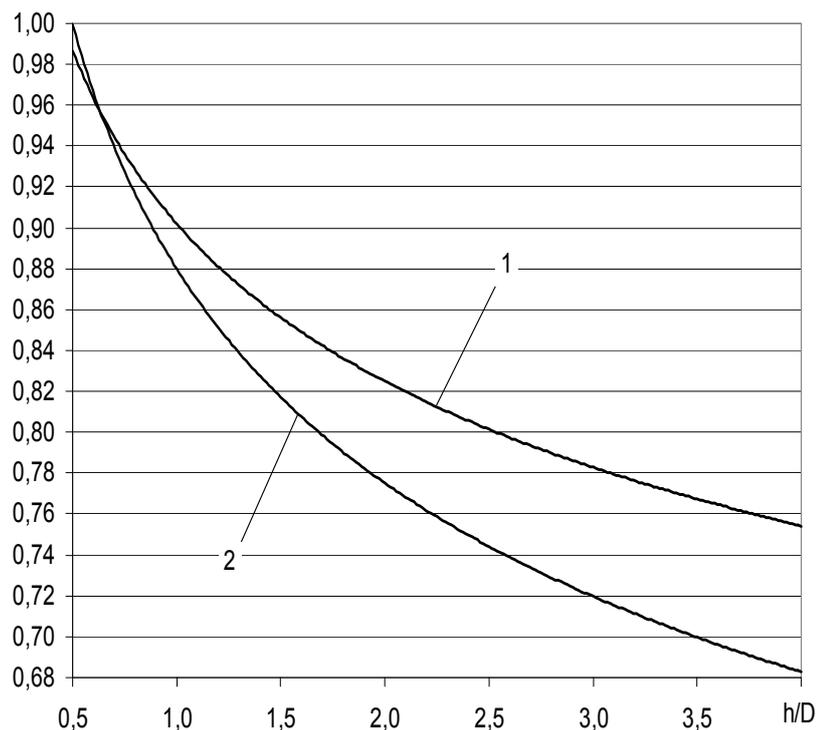


Рис. 1. Зависимости, характеризующие изменение локального пристеночного параметра интенсивности закрутки $\text{tg}(\varphi) / \text{tg}(\varphi)_0$ (1) и тангенциальной составляющей скорости воздушного потока в пристеночной зоне U_r/U_{r0} (2) по высоте сепарационной камеры

Полученные кривые представляют собой монотонно убывающие зависимости вида

$$\text{tg}(\varphi) / \text{tg}(\varphi)_0 = 0,902(h/D)^{-0,129}; \quad (1)$$

$$U_r/U_{r0} = 0,88(h/D)^{-0,183}. \quad (2)$$

Основными силами, оказывающими значимое влияние на пылевую частицу, движущуюся в пристенной зоне сепарационной камеры пылеуловителя ВЗП, являются: сила сопротивления обтеканию газовым потоком; центробежная сила; кориолисова сила; сила тяжести.

Для описания движения пылевой частицы в закрученном потоке наиболее удобным является использование цилиндрической системы координат.

В радиальном направлении на частицу оказывают воздействие центробежная сила $F_{ц}$ и радиальная проекция силы сопротивления обтеканию газовым потоком F_{μ} . Для определения последней использована гипотеза об отсутствии радиальной составляющей скорости газового потока в пристенной зоне слабо и умеренно закрученного течения. Таким образом,

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 r + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \frac{\rho \lambda_{\text{ч}} \pi d_{\text{ч}}^2}{8}, \quad (3)$$

где r – радиальная координата; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы; ρ – плотность воздуха; $\lambda_{\text{ч}}$ – коэффициент сопротивления обтеканию частицы газовым потоком; m – масса частицы; t – время.

Проекция сил на подвижную касательную ось τ складывается из проекции силы сопротивления обтеканию потоком F_{μ} и кориолисовой силы. Заменяя угловую скорость линейной на подвижной оси, получим:

$$m \frac{d^2 \tau}{dt^2} = \left(\frac{d\tau}{dt} - U_{\tau} \right)^2 \frac{\rho \lambda_{\text{ч}} \pi d_{\text{ч}}^2}{8} - m \frac{2}{r} \frac{dr}{dt} \frac{d\tau}{dt}. \quad (4)$$

Проекция сил на вертикальную (продольную) ось складывается из силы тяжести F_m и вертикальной проекции силы сопротивления обтеканию частицы газовым потоком F_{μ} :

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = (F_{\mu} + F_m) = \left(\frac{dy}{dt} - U_x \right)^2 \frac{\rho \lambda_{\text{ч}} \pi d_{\text{ч}}^2}{8} - mg. \quad (5)$$

Для упрощения полученных уравнений, характеризующих проекции сил на продольную и подвижную касательные оси, принимается допущение о совпадении окружной и продольной составляющих скорости с соответствующими проекциями скорости газового потока. Данное допущение основано на результатах визуального наблюдения, позволяющих утверждать, что частицы крупностью до 180 мкм в пристенной области практически движутся по траектории движения закрученного газового потока ввиду незначительности масс и сил инерции в сравнении с аэродинамическими силами. Тогда уравнения, описывающие движение частицы, принимают вид:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 r + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \frac{\rho \lambda_{\text{ч}} \pi d_{\text{ч}}^2}{8}; \quad \frac{d\varphi}{dt} = \frac{U_{\tau}}{R}; \quad \frac{dx}{dt} = U_x, \quad (6)$$

где R – радиус сепарационной камеры.

Используя значения (1) и (2), имеем:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = mr \left(\frac{0,88U_{\tau 0} x^{-0,183}}{R} \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \frac{\rho \lambda_{\text{ч}} \pi d_{\text{ч}}^2}{8};$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{0,88U_{\tau 0}}{R} x^{-0,183}; \quad \frac{dx}{dt} = 0,794U_{\tau 0} x^{-0,312}. \quad (7)$$

Для оценки влияния интенсивности закрутки, создаваемой верхним вводом, на эффективность улавливания аппарата ВЗП проведены численные эксперименты. При

численном интегрировании полученной системы приняты следующие начальные условия:

- за начало отсчета принимается точка, расположенная на нижней границе тангенциального ввода, наиболее близкая к центру поперечного сечения сепарационной камеры $x = 0$, $r = 0,6R$ (ширина тангенциального патрубка принята равной $0,4R$);

- тангенциальная составляющая скорости частицы $\frac{d\tau}{dt} = U_{\tau 0}$, а начальное

значение угловой скорости соответственно $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{U_{\tau 0}}{R}$;

- значение вертикальной (продольной) составляющей скорости частицы на входе в сепарационную камеру, согласно допущениям, принятым при составлении уравнений, равна начальному значению вертикальной составляющей скорости газового

потока $\frac{dx_0}{dt} = U_{x0}$;

- радиальная составляющая скорости частицы во входном сечении сепарационной камеры, исходя из тех же допущений равна таковой составляющей скорости воздушного потока, т.е. $\frac{dr_0}{dt} = 0$.

Условием, позволяющим сделать вывод о сепарации пылевидной частицы, является значение радиальной координаты, равное радиусу сепарационной камеры $r = R$. При этом значение угловой координаты φ не имеет практического значения. В качестве переменных приняты размер пылевой частицы $d_{\text{ч}}$ и начальный параметр интенсивности закрутки потока Φ^*_0 . Свойства пылевых частиц (плотность $\rho_{\text{ч}}$ и коэффициент аэродинамического сопротивления $\lambda_{\text{ч}}$) приняты идентичными свойствам пыли кварцевого песка соответствующей фракции.

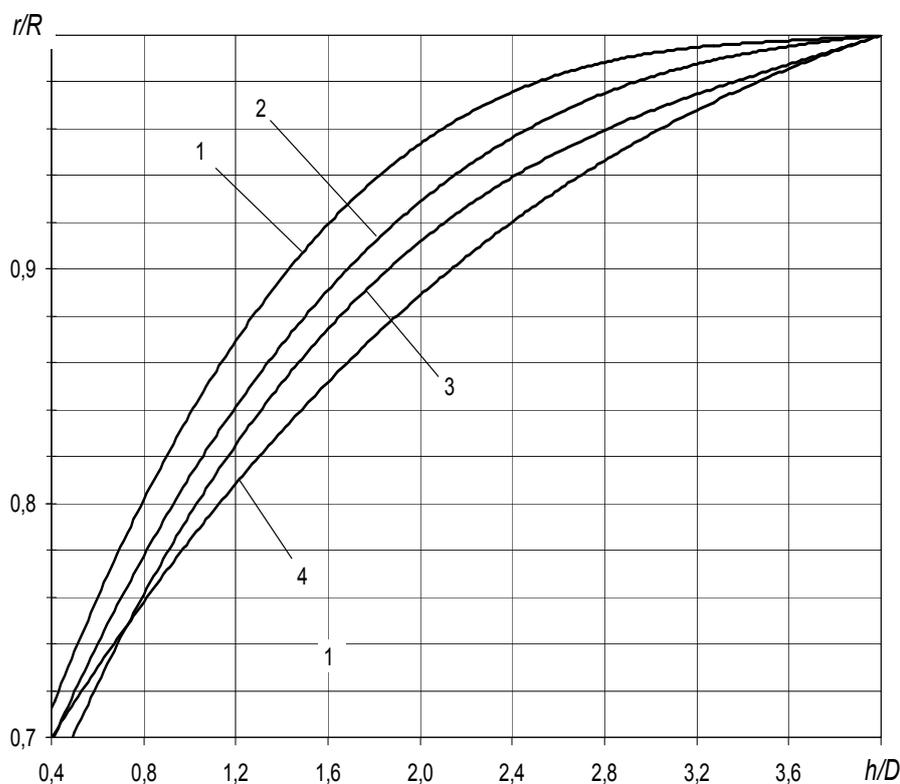


Рис. 2. Результаты расчета зависимости радиальной координаты пылевой частицы от вертикальной при движении в сепарационной камере пылеуловителя ВЗП:

1 – $d_{\text{ч}} = 37$, $\Phi^*_0 = 4$; 2 – $d_{\text{ч}} = 35$, $\Phi^*_0 = 4,4$; 3 – $d_{\text{ч}} = 33$, $\Phi^*_0 = 4,8$; 4 – $d_{\text{ч}} = 25$, $\Phi^*_0 = 6$

Как видно из рис. 2, минимальный размер частиц, сепарируемых в результате контакта со стенкой при прохождении сепарационной камеры, составляет 25 мкм. Для улавливания частиц данной фракции необходимо задавать значения $\Phi^*_0 = 6$. При дальнейшем увеличении крупности частиц происходит снижение значений Φ^*_0 . Принятое в ходе эксперимента минимальное значение интенсивности начальной закрутки, позволяющей согласно расчетам улавливать частицы кварцевого песка крупностью 37 мкм, составляет $\Phi^*_0 = 4$. Данное значение характерно для пылеуловителей циклонного типа и позволяет сепарировать частицы крупнее 50 мкм.

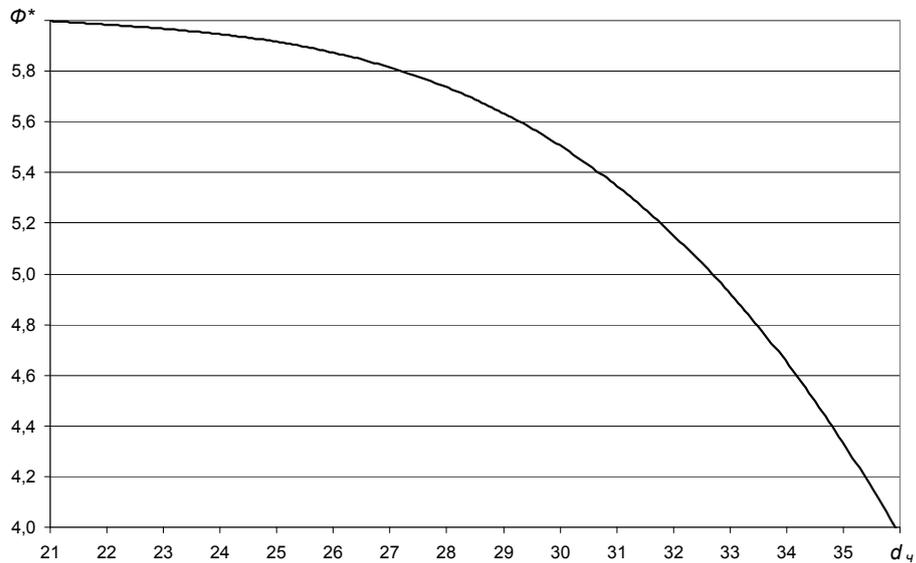


Рис. 3. Расчетная зависимость формпараметра закрутки потока верхнего ввода пылеуловителя ВЗП от размера сепарируемой пылевой частицы $\Phi^*_0(d_{ч})$

Для проверки теоретических результатов проведены экспериментальные исследования, целью которых являлась оптимизация интенсивности закрутки потока, создаваемой верхним тангенциальным вводом пылеуловителя ВЗП и относительного заглубления аксиального выходного патрубка в сепарационную камеру. При проведении экспериментальных исследований в качестве параметров оптимизации приняты эффективность пылеулавливания η и аэродинамическое сопротивление ξ . При проведении исследований в качестве определяющих факторов были выбраны: $Re_{ср}$ – среднерасходное число Рейнольдса в сепарационной камере; Φ^*_r – геометрический формпараметр закрутки, создаваемый сменным верхним тангенциальным вводом; h/D – заглубление выходного аксиального патрубка в сепарационную камеру отнесенное к диаметру аппарата; $L_n/L_{общ}$ – отношение расхода запыленного воздуха, поступающего на нижний ввод, к общему, подаваемому в пылеуловитель.

Для режима работы пылеуловителя при $Re_{ср} = 50000$ уравнения регрессии имеют вид:

$$\eta = 23,30 + 14,23\Phi_r^8 - 1,68\frac{h}{D} + 189,25\frac{L_n}{L_{общ}} - 1,01(\Phi_r^8)^2 - 0,10\left(\frac{h}{D}\right)^2 - 321,33\left(\frac{L_n}{L_{общ}}\right)^2 - 0,13\Phi_r^8 \cdot \frac{h}{D} \cdot \frac{L_n}{L_{общ}}; \quad (8)$$

$$\xi = 235,13 - 64,17\Phi_r^8 + 27,23\frac{L_n}{L_{общ}} + 8,45(\Phi_r^8)^2 - 50,0\left(\frac{L_n}{L_{общ}}\right)^2 + 10\Phi_r^8 \cdot \frac{h}{D} \cdot \frac{L_n}{L_{общ}}. \quad (9)$$

При работе пылеуловителя с расходами ниже и выше заданного (соответственно $Re_{cp} = 38000$ и $Re_{cp} = 62000$) наблюдается существенное снижение эффективности улавливания, что позволяет считать значение $Re_{cp} = 50000$ оптимальным для аппаратов серии ВИП; полученные значения хорошо согласуются с результатами других исследователей [2].

На рис. 4 приведена зависимость эффективности пылеулавливания аппарата ВИП от геометрического параметра эффективности закрутки верхнего ввода. Как следует из приведенных результатов, эффективность улавливания существенно возрастает при увеличении интенсивности закрутки потока в верхнем вводе во всем диапазоне варьирования экспериментальных факторов. На практике повышение Φ_r^* до величин выше 5,5 нежелательно ввиду существенного роста аэродинамического сопротивления пылеуловителя (рис. 5). Так, например при увеличении интенсивности закрутки Φ_r^* с 5 до 6 возрастает коэффициент местного сопротивления пылеуловителя на 48...52 %, в зависимости от режима работы.

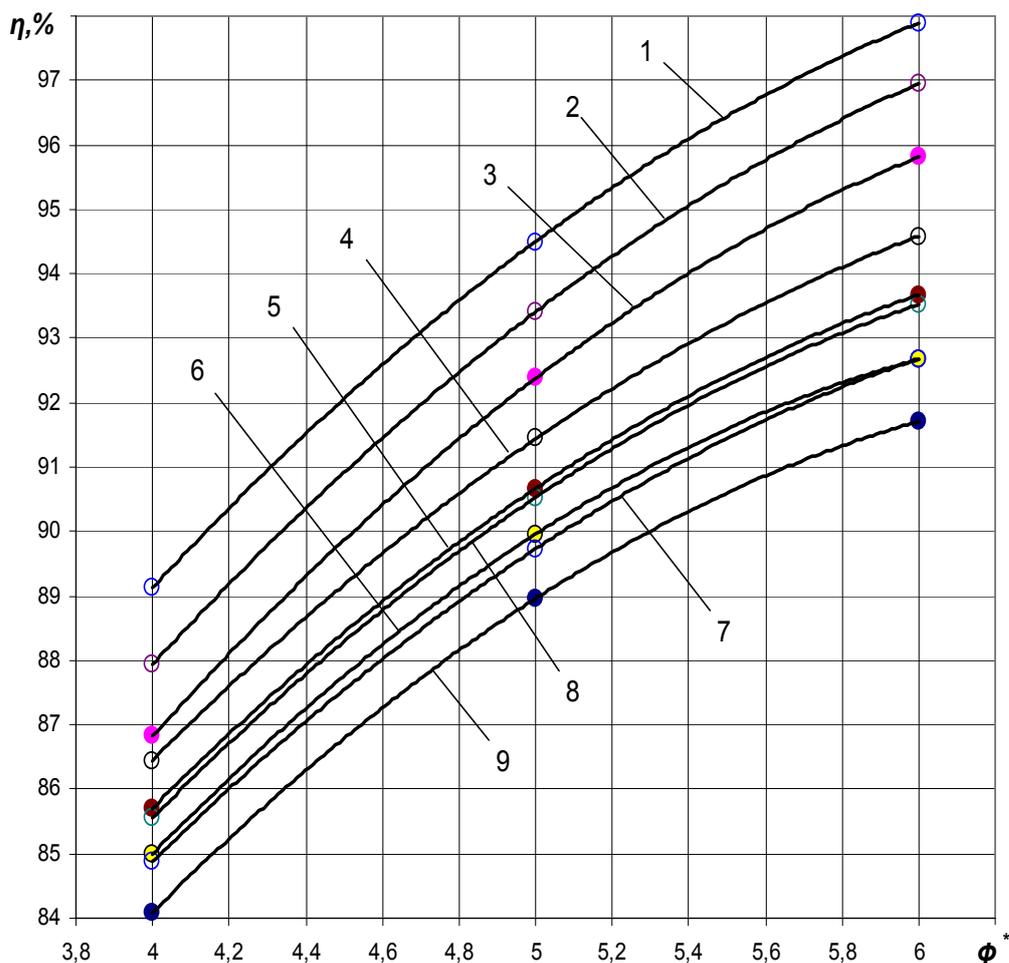


Рис. 4. Зависимость эффективности пылеулавливания аппарата ВИП от геометрического параметра эффективности закрутки верхнего ввода $\eta(\Phi_r^*)$ при $Re_{cp} = 50000$:
 1 – $L_n/L_{общ} = 0,3$, $h/d = 1,4$; 2 – $L_n/L_{общ} = 0,3$, $h/d = 1,8$; 3 – $L_n/L_{общ} = 0,3$, $h/d = 2,2$;
 4 – $L_n/L_{общ} = 0,2$, $h/d = 1,4$; 5 – $L_n/L_{общ} = 0,2$, $h/d = 1,8$; 6 – $L_n/L_{общ} = 0,2$, $h/d = 2,2$;
 7 – $L_n/L_{общ} = 0,4$, $h/d = 1,4$; 8 – $L_n/L_{общ} = 0,4$, $h/d = 1,8$; 9 – $L_n/L_{общ} = 0,4$, $h/d = 2,2$

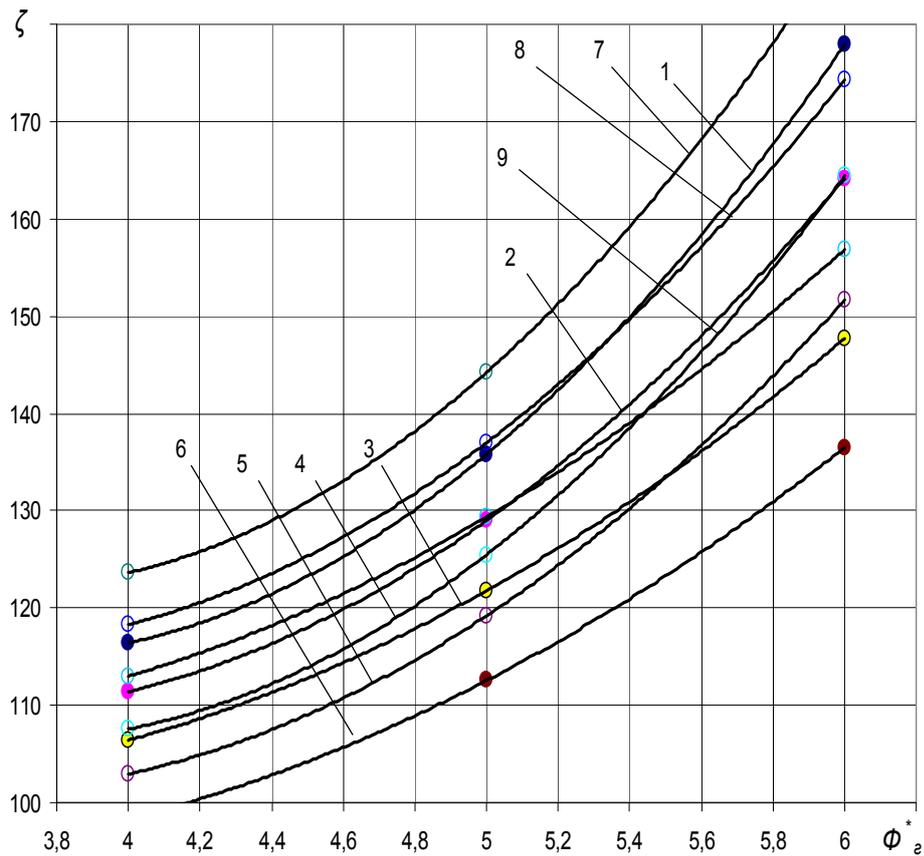


Рис. 5. Зависимость коэффициента местного сопротивления аппарата ВИП от геометрического параметра эффективности закрутки верхнего ввода ($\zeta(\Phi_g^*)$):

- 1 – $Re=50000$, $L_n/L_{обш} = 0,3$; 2 – $Re=50000$, $L_n/L_{обш} = 0,2$; 3 – $Re=50000$, $L_n/L_{обш} = 0,4$;
 4 – $Re=60000$, $L_n/L_{обш} = 0,3$; 5 – $Re=60000$, $L_n/L_{обш} = 0,2$; 6 – $Re=60000$, $L_n/L_{обш} = 0,4$;
 7 – $Re=40000$, $L_n/L_{обш} = 0,3$; 8 – $Re=40000$, $L_n/L_{обш} = 0,2$; 9 – $Re=40000$, $L_n/L_{обш} = 0,4$

Выводы:

1. Конфигурация верхнего закрученного ввода, обеспечивающая максимальные значения эффективности пылеулавливания аппаратов ВЗП, отличается от конфигурации тангенциального ввода классических циклонов.
2. Эффективность пылеулавливания аппарата ВИП повышается при увеличении параметра закрутки потока верхнего ввода.
3. Значения интенсивности закрутки верхнего ввода аппаратов ВИП, обеспечивающие наилучшее сочетание эффективности работы и аэродинамического сопротивления, лежат в пределах $\Phi_g^* = 5,2 \dots 5,4$.

Список литературы

1. Азаров, В.Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Опыт внедрения: моногр. / В.Н. Азаров. – Волгоград: РПК «Политехник»: ВолгГТУ, 2003. – 136 с.
2. Азаров, В.Н. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов / В.Н. Азаров, Н.М. Сергина // Строительные материалы. – 2003. – №8. – С.14–15.

References

1. Azarov, V.N. Dust Collector with counter swirling flows. Experience of implementing: monogr. / V.N. Azarov. – Volgograd: «Polytechnics», 2003. – P.136.
2. Azarov, V.N. Dust collection system with inertial devices in the production of building materials / V.N. Azarov, N.M. Sergina // Building Materials. – 2003. – №8. – P.14–15.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 711.4:711.52:72 (091)

Вятский государственный технический университет

Россия, 610000, г. Киров,
ул. Московская, 36
тел.: +7 (8332) 64-89-89

Елькина Ольга Владимировна,
аспирант кафедры «Архитектура
и градостроительство»,
архитектор III категории
ООО «Инженерная фирма «Стройпроект»
E-mail: olja13.1989@mail.ru

Ижевский государственный технический университет

Россия, 426069, г. Ижевск,
ул. Студенческая, д. 7
тел.(факс): (3412) 50-40-55

Дмитриева Наталья Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
старший преподаватель кафедры
«Проектирование зданий»
E-mail: dmitrieva.nataliya@rambler.ru

Vyatka State Technical University

Russia, 610000, Kirov, 36, Moscovskaya St.
tel.: +7 (8332) 64-89-89

Elkina Olga Vladimirovna,
Postgraduate of the department «Architecture
and city construction»,
architect III category LLC «Engineering
company «Strojproect»
E-mail: olja13.1989@mail.ru

Izhevsk State Technical University

Russia, 426069, Izhevsk, 7,
Studencheskaya St.
tel. (fax): (3412) 50-40-55

Dmitrieva Natal'ya Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Senior lecturer of the department «Designing
of buildings»
E-mail: dmitrieva.nataliya@rambler.ru

СИНЕРГИЯ ИСТОРИЧЕСКИ СЛОЖИВШЕГОСЯ АРХИТЕКТУРНОГО ЦЕНТРА В СИНЕРГЕТИКЕ ГОРОДА

О.В. Елькина, Н.Н. Дмитриева

Абстракт-исследование посвящено мониторингу симбиоза синергетики города с синергией исторически сложившегося центра, решению задач инновационной градостроительной политики, креативной регенерации архитектурного наследия, мутуализму синергетики города и синергии исторически сложившегося центра (тесной связи единиц подразделения синергии города с последующей их совместной эволюцией).

Ключевые слова: синергия, синергетика, регенерация, мутуализм.

SYNERGY OF THE HISTORICAL ARCHITECTURAL CENTER IN CITY SYNERGETICS

O.V. El'kina, N.N. Dmitrieva

Abstract is devoted to the symbiosis monitoring of city synergy with the synergy of the historical centre, to the decision of the tasks on innovative urban planning policies, creative regeneration of the architectural heritage, mutualism of city synergy and synergies of the historical centre (to close connection of units of subdivisions of city synergies with their subsequent joint evolution).

Keywords: synergy, regeneration, mutualism.

Стихийно уплотняемая квартальная застройка подобна живой структуре с постоянным обновлением и ростом составляющих её кластеров. Пристройки, надстройки, поглощения мелких зданий крупными объемами постепенно приводят к сложному образованию, в котором отдельные исторические объемы занимают все более ограниченные пространства. Однако наступает критический период, когда чередующиеся ячейки начинают дробиться, создавая дисгармонию и нерациональность функционирующего связевого пространства и нарушая жизнедеятельность города. Тогда появляется необходимость разобраться в сложившейся ситуации, провести анализ территории и существующей застройки. Это даст возможность пересмотреть градостроительную политику и сформировать грамотно организованное пространство, иначе говоря – провести полномасштабную реконструкцию.

1. Понятие синергетики и её значимость в регенерации архитектурного наследия. Слово «синергетика» имеет греческое происхождение и буквально означает «совместный, согласованно действующий». В энциклопедическом словаре ему как научному термину дается следующее определение: «Синергетика – научное направление, изучающее связи между элементами структуры (подсистемами), которые образуются в открытых системах благодаря интенсивному (потокосому) обмену веществом и энергией с окружающей средой в неравновесных условиях. В таких системах наблюдается согласованное поведение подсистем, в результате чего возрастает степень их упорядоченности, то есть уменьшается энтропия (так называемая самоорганизация)» [1].

Объединение всех параметров предстоящих работ по мониторингу синергетики города и взаимосвязь с синергией исторически сложившегося центра – памятника архитектурного наследия – являет собой согласованное поведение подсистем, в котором появляется возможность формирования, структурирования и проведения реконструкции, позволяющей городу развиваться и решать поставленные задачи инновационной градостроительной политики.

Причиной необходимости разработки синергетического метода в градостроительстве является то, что из всех видов проектирования именно он сталкивается с иррациональными явлениями, не поддающимися четким определениям и объяснениям, а реализация генеральных планов городов в среднем составляет лишь 20–30 % (и это считается нормальным показателем). Остальные 70–80 % продиктованы самой жизнью, ее непредсказуемостью и какими-либо факторами, которые не были, а скорее всего, и не могли быть заведомо учтены при проектировании. В современном градостроительстве получают широкое развитие принципы синергетики – науки о процессах развития и самоорганизации сложных систем [2].

Таким образом, синергетический метод является инструментом мутуализма синергетики города и синергии исторически сложившегося центра, который может быть выражен в полномасштабном инновационно-реновационном генеральном плане города. А неучтенные факторы проектирования, «продиктованные самой жизнью», выражаются условным понятием «привязать по месту», что подразумевает испытание временем.

Мутуализм являет собой тесный контакт видов пространств с последующей их совместной эволюцией. На примере г. Кирова это проявляется как наличие двух разно сформированных городских пространств: первое – исторически сложившееся архитектурное ядро города с явно выдержанным стилевым, архитектурным и художественным содержанием; второе – постиндустриальная застройка, обволакивающая историческое ядро с северной, южной и западной сторон. Существование этих разноликих пространств определяет выражение «тесный контакт видов». Само явление мутуализма выражено в совместной эволюции двух городских пространств с течением времени, связанной с изменениями в политике, экономике, вкусах и т.п. Две среды непосредственно контактируют друг с другом. Их объединяют инфраструктура, люди, насыщенность значимыми для комфортной жизнедеятельности людей объектами. Эволюция этих двух пространств заключается в развитии каждого из них, что является неотъемлемой составляющей для перспективного роста и развития всего города. При

совместном взаимодействии каждое отдельно выделенное городское пространство даёт положительный эффект для развития противоположного, самого себя и в общем итоге всего города. Таким образом, город – это синергетика.

2. Мутуализм – целостно-единое новообразование. В настоящее время городское пространство г. Кирова не представляет единого целого, а разделено на урбанизированную постиндустриальную часть города и пытающуюся выжить сомасштабную прибрежную часть города с памятниками архитектурного наследия. Не стоящее на месте развитие города и отсутствие системности в застройке создаёт атомарность в образе города.

Атомарность подразумевает раздробленность городского пространства в облике застройки, архитектуры, зонированности и выражается в разрастании городских территорий и выявлении промышленных зон внутри городских структур деятельности человека.

Ни более значимой с точки зрения историко-архитектурной и социально-культурной роли представляется часть застройки города в районе берегового пространства реки Вятки, являющаяся памятником архитектуры и имеющая историческую ценность градостроительного образования (из общей массы современной застройки).

После оценки объектов принимаем решение о применении к ним методов регенерации, сонации или реставрации в связи с их историческим, культурологическим значением и физическим состоянием.

Адаптация сложившихся «исторических берегов» к новым градостроительным и экономическим процессам заключается в целесообразном использовании городской территории, а также в рациональном построении транспортной схемы. Растущую тенденцию смены функционального назначения объектов следует рассматривать как особо актуальную при их адаптации к современным социальным условиям. Целью такого процесса является мутуализм исторических зданий в синергетику города и его культурную жизнь. Архитектурное наследие при совместном взаимодействии с программами по его возрождению, сохранению и опытом адаптации в постиндустриальную городскую структуру переходит из типа обособленного «выживания» в тип связевых, комплексных решений по адаптации исторических памятников, что приводит к способности самоорганизации множества взаимодействующих структур города. В дальнейшем система связей образует открытую систему зависимости всех сфер города для его комплексного развития. Сферы: транспорт и дороги, городская среда, ЖКХ, безопасность и право, медицина, образование и т.д. При комплексной активизации деятельности, направленной на перспективное развитие города, можно добиться «экономической отдачи» вложений. Адаптация центральных территорий в направлении, соответствующем городскому планированию, открывает дополнительные перспективы для креативного развития территорий, для определения уровня значимости центральной части городского пространства и её востребованности населением, территории исторической зоны; также для выделения критериев её коммерческой и социальной привлекательности исследуется возможное размещение здесь предприятий обслуживания, досуга, торговли и т.п.

Мониторинг функциональной направленности рассматриваемой среды определяет тенденции наполнения её культурными составляющими, выражающими потребности общества. В данной ситуации предполагается организация креативных преобразований памятников архитектурного наследия, профилирующей линией которой будет синергетика. Таким образом, адаптация памятников архитектурного наследия к современной жизни города, потребностям, интересам общества поможет сделать их эксплуатируемыми, финансируемыми, финансово оправданными с точки зрения вложений и вовлечет их в активную жизнь города. Они станут частью процесса синергетики. Определение роли нового объекта в системе сложившегося ансамбля – важное звено в формировании архитектурно-пространственной структуры.

Гармоничное внедрение нового объекта в существующую историческую среду происходит на основе принципа мутуализма, когда два существующих рядом объекта-симбиоза приносят какую-либо пользу друг другу [1]. Исторически сложившийся

архитектурный центр города – «музей под открытым небом» – несёт пространственно-образующую функцию, а новый объект призван, дополняя, создать живую, экономически целесообразную и социально привлекательную среду обитания человека, улучшить архитектурно-художественные качества данной городской среды. Создаётся мутуализм на уровне предметов, явлений, взглядов, принципов, менталитета, отношений и т.п. Вид такой системы является синергией естественного (того, что существует) и искусственного (того, что появляется благодаря каким-либо действиям, к примеру: реконструкции, сонации, реставрации) соединения разнообразных структур: культурных позиций, мировоззрений, видов искусств и их стилей.

Существующие исторически значимые объекты, являясь предметно-пространственным полем жизнедеятельности людей, влияют на экологию, безопасность, психику каждого индивида. Необходимость рассмотрения такого фактора, как воздействие архитектурной среды центра города, даёт возможность сформулировать главный принцип преобразований данного участка – комфорт для отдельного человека.

Заключение. Таким образом, современный город несет ответственность перед будущими поколениями, определяет скорость инновационно-реновационного проектирования и строительства, способных улучшить жизнь горожан, создает эффективную систему мутуализма синергетики города и синергии исторически сложившегося центра, формирует городской уклад, передающийся из поколения в поколение. Мутуализм города наряду с традиционными культурными ценностями становится явлением новой культуры, обеспечивающим бережное отношение человека к себе и своему городу.

Список литературы

1. Екатеринбург-Сити: абстрактные формы в реальном пространстве // Татлин.– 2003.– Январь-февраль. – С.15.
2. Системные образования: информация и отражение. Синергетика (терминологическая справка) (СЭС, 1989). – Режим доступа: <http://vbvnbv.narod.ru/synergetikos.htm>.
3. Анисимов, А.Н. Синергетический метод градостроительного проектирования / А.Н. Анисимов. – Режим доступа: http://book.uraic.ru/project/conf/txt/005/archvuz22_pril/24/template_article-ar=K21-40-k36.htm.

References

1. Ekaterinburg – city: abstract forms in the real space // Tatlin.- 2003.- January-February. – P.15 (the date of the circulation 04.02.2013).
2. The system of formation: information and reflection. Synergetics (the terminological help) (SES, 1989). – Mode of access: <http://vbvnbv.narod.ru/synergetikos.htm> (.).
3. Anisimov, A. Synergetic method of urban planning / A. Anisimov. – Mode of access: http://book.uraic.ru/project/conf/txt/005/archvuz22_pril/24/template_article-ar=K21-40-k36.htm.

УДК 726.5

Московский архитектурный институт
Россия, 107031, Москва,
ул. Рождественка, д. 11
тел.: 8 (495) 625-50-82

Борисов Сергей Владимирович,
кандидат архитектуры, доцент кафедры
«Основы архитектурного проектирования»,
главный архитектор проекта ООО
архитектурное бюро «Лиза»
E-mail: borisov-sv@inbox.ru

Moscow Institute of Architecture
Russia, 107031, Moscow, 11,
Rozhdestvenka St.
tel.: 8 (495) 625-50-82

Borisov Sergey Vladimirovich,
Candidate of architecture, Associate Professor
of the department "Fundamentals of
Architectural Design", chief architect of
Architectural bureau "Liza"
E-mail: borisov-sv@inbox.ru

ТРАДИЦИОННЫЕ ПЛАНИРОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРАВОСЛАВНЫХ ПРИХОДСКИХ ХРАМОВ: АКТУАЛЬНОСТЬ СОВРЕМЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

С.В. Борисов

Рассмотрены наиболее распространенные в России планировочные решения приходских храмов. Проанализирована обоснованность их современного применения.

Ключевые слова: православный храм, богослужение, архитектурное проектирование, объемно-планировочная композиция.

TRADITIONAL PLANNING SOLUTIONS OF ORTHODOX PARISH CHURCHES: THE RELEVANCE OF MODERN APPLICATIONS

S.V. Borisov

The article analyzes a number of planning solutions of parish churches, the most common in Russia. The validity of their current use have been considered.

Keywords: Orthodox Church, liturgy; architectural planning, space-planning composition.

О символике элементов храма. Создание современной церкви, начинающееся с архитектурного проекта, неизбежно опирается на традицию, как совокупность привычных и знакомых для абсолютного большинства прихожан характеристик православных храмов. Рассуждая о проблеме времени в древнерусском искусстве, Г.К. Вагнер отмечает: «Для средневекового мышления характерно историческое время... Чувство историзма, представления о творении мира и ветхозаветной истории заставляли сознание постоянно жить в прошедшем времени, а устремленность христианина к вечному спасению вела к будущему, причем... в форме постоянного повторения того, что было!» [1, с.62]. Символике православного храма, теме сложной и объемной, посвящены исследования, восходящие в своей основе к творениям святых отцов Церкви, где рассматриваются многоплановые значения храма в целом и его отдельных частей. Приведем выборочно некоторые из них, отражающие различие символических значений составляющих храм элементов и освещающие ряд вопросов, связанных с формированием архитектурных решений.

Храм, как дом Господень, является образом Царства Небесного на земле, понятия о Творении, Богочеловеческого естества Господа Иисуса Христа, Вселенской Церкви как тела Христова, человека как храма Божия, что отмечается, в частности, архиепископом Илларионом (Троицким) [2] и в трудах современных клириков Православной Церкви [3]. Храм разделяется на три части: алтарь, среднюю часть и притвор, первая из которых символизирует Божественную природу Христа Спасителя, а последние две – человеческую природу Иисуса Христа.

Средняя часть храма символизирует область Небесного бытия в творении Божиим, человеческую душу Христа Спасителя и соответствует второму чину Ангельских

существ и «второй степени церковного народа – верным» [3]. Купол над средней частью храма, как и алтарь за иконостасом, отделяющим «область бытия Троицкого Бога, не смешивающегося со своим творением» [3], относится к Небесной области бытия. Алтарь соотносится с символическим значением Неба, Рая, Царства Небесного, духа человека и соответствует высшему чину Ангельских существ и высшей степени церковного народа – освященному духовенству [3]. Притвор обозначается как «область земного бытия в Творении Божиим», «символ греховной земли и ада», портал входа в храм – «узкий путь, ведущий в Царство Небесное» [3].

При общности символики для православных храмов характерно разнообразие архитектурных решений, составляющих «каноническую традицию». Различающиеся по символическим значениям алтарь, средняя часть храма, приделы, притвор и другие части образуют устойчивые во времени функционально-планировочные связи, одна из которых – повсеместно и не всегда обоснованно применяющаяся композиция храма «кораблем» [4]. Рассмотрим, насколько целесообразно их дословное копирование в настоящее время и возможен ли поиск новых композиционных решений, опирающихся на традицию храмостроения.

Оценка композиционного решения храма на основе функционально-планировочных критериев. Во всех освященных храмах проявляется их литургическое, символическое значение и принадлежность канонической традиции. Вместе с тем многие из действующих в настоящее время приходских храмов относятся к объемно-планировочным композициям, возникшим в предшествующие столетия при реализации разделения на отапливаемые и неотапливаемые помещения или в результате многочисленных перестроек. При значительном числе прихожан по праздникам и воскресным дням в некоторых храмах возникают условия, препятствующие сосредоточению на молитве, восприятию богослужения. Прихожане удалены от амвона в вытянутых по направлению восток-запад храмах; узкие по пропорциям помещения вызывают нежелательные пересечения потоков людей при их перемещении [5].

В ряде храмов затруднено выделение пространственно изолированного места для Таинства исповеди, церковные киоски внесены в объем трапезных; прихожане, приобретающие свечи и заказывающие требы во время богослужения, препятствуют молитвенному настрою собравшихся. Перечисленные условия вызывают необходимость оценки проектируемых храмов с точки зрения функционально-планировочных факторов. Анализ композиционных решений проведем в табличной форме, где каждый из храмов оценивается по нескольким основным позициям. Среди них: различные режимы эксплуатации частей храма (ежедневное богослужение в наименьшем по площади помещении храма и объединение всех помещений по праздничным дням). Рассмотрим богослужение в выделенном и объединенных объемах храма. Отметим удобство размещения святыни – музейной ценности, что актуально в связи с принятием Федерального закона Российской Федерации № 327-ФЗ «О передаче религиозным организациям имущества религиозного назначения, находящегося в государственной или муниципальной собственности» [6, 7]. Определим наименее удобные для прихожан части храма, в которых амвон не находится в зоне прямой видимости или значительно удален. Рассмотрим перемещение прихожан во время Таинств Причастия и Помазания елеем, подхода к Кресту (амвону); выделение пространственно изолированной зоны для Таинства исповеди.

В качестве примеров примем наиболее часто встречающиеся в Подмосковном регионе объемно-планировочные решения храмов, рассматриваемые как композиции из различных планировочных ячеек и характеризующиеся наличием или отсутствием трапезной, числом приделов и вариантами их расположения. При комплексном сопоставлении результатов проведенного в табличной форме анализа (рис. 1–4) представляется возможным конкретизировать ряд требований к приходским храмам.

Различные режимы эксплуатации уместны для объемно-планировочных композиций 3–7 (рис. 1–4), причем в третьей (рис. 2 (а)) и четвертой (рис. 2 (б)) схемах выделенный придел предназначен только для одного из функциональных назначений:

ежедневного богослужения или размещения святыни – музейной ценности. В пятом храме (рис. 3 (а)) выделяется наиболее значительное по площади помещение, объединяющее трапезную и приделы, что не удовлетворяет условию отделения наименьшей по площади части с собственным входом, притвором (свечной лавкой) и связью с колокольной. В шестой (рис. 3 (б)) и седьмой (рис. 4) объемно-планировочных композициях возможность выделения приделов условна, так как они удалены от входа, отделяемое помещение получает неудобные пропорции. В целом для рассмотренных храмов не найдено рационального планировочного решения отделяемых помещений как по их площади, так и по пропорциям.

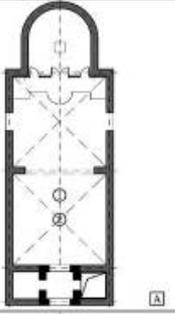
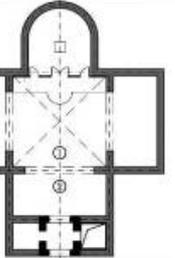
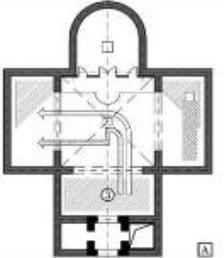
РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЕ СВЯТЫНИ	БОГОСЛУЖЕНИЕ В ПОЛНОМ ОБЪЕМЕ ХРАМА	ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ АРХИТ.-ХУДОЖЕСТВ.	ПУТИ ПРЕОДОЛЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ
	 <p>зона дискомфорта исповедующиеся Причастие, /подход к Кресту/ помазание елеем</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 невозможность устройства различных режимов эксплуатации частей храма 2 невозможность выделения помещения для размещения реликвии 3 значительная зона дискомфорта, удаленная от амвона 4 пересечение потоков прихожан при Таинствах Причастия, помазания елеем, а также подхода к Кресту 5 отсутствие выделенной зоны для таинства исповеди 	<ol style="list-style-type: none"> 1 устройство приделов, с возможностью использования в качестве самостоятельного храма 2 устройство придела с соблюдением режима хранения, без постоянного богослужения, со связью с основным объемом храма 3 соблюдение пропорций помещений, близких к квадрату 4 использование придела для прохода прихожан 5 	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ
		<p>А основной объем храма закрыт с запада, со стороны главного входа</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 2 3 	<p>А значительный по высоте главный объем храма, асимметричное расположение колокольной, упряднение крупного объема с запада</p> <ol style="list-style-type: none"> 3 	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ

Рис. 1. Оценка проектного решения храма на основе функционально-планировочных критериев

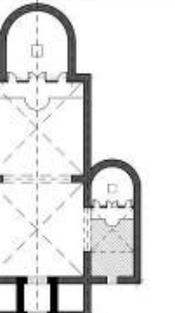
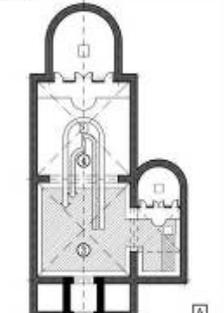
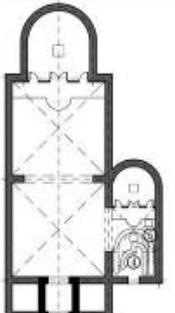
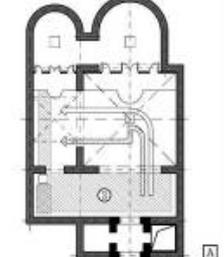
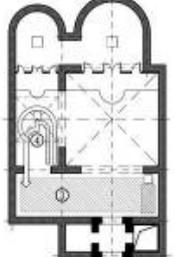
РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЕ СВЯТЫНИ	БОГОСЛУЖЕНИЕ В ПОЛНОМ ОБЪЕМЕ ХРАМА	БОГОСЛУЖЕНИЕ В ВЫДЕЛЕННОМ ОБЪЕМЕ ХРАМА	ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ АРХИТ.-ХУДОЖЕСТВ.	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ
			<p>зона дискомфорта (3) (4) исповедующиеся Причастие, /подход к Кресту/ помазание елеем</p> <p>А</p>	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ
			<p>(3) (4) /для выделенного объема/ (6) выделение наибольшего по площади помещения, наименее выразительного по решению интерьера</p> <p>А</p> <p>ПУТИ ПРЕОДОЛЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ (6) планировочное решение с отделением для ежедневного богослужения одного из приделов</p>	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ	ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ

Рис. 2. Оценка проектного решения храма на основе функционально-планировочных критериев

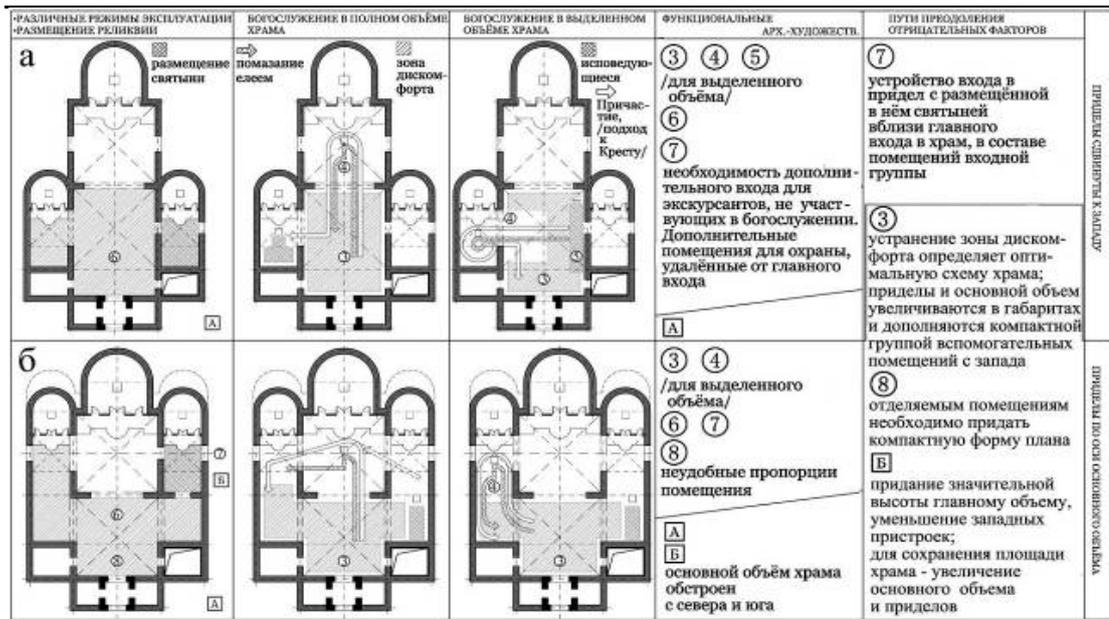


Рис. 3. Оценка проектного решения храма на основе функционально-планировочных критериев

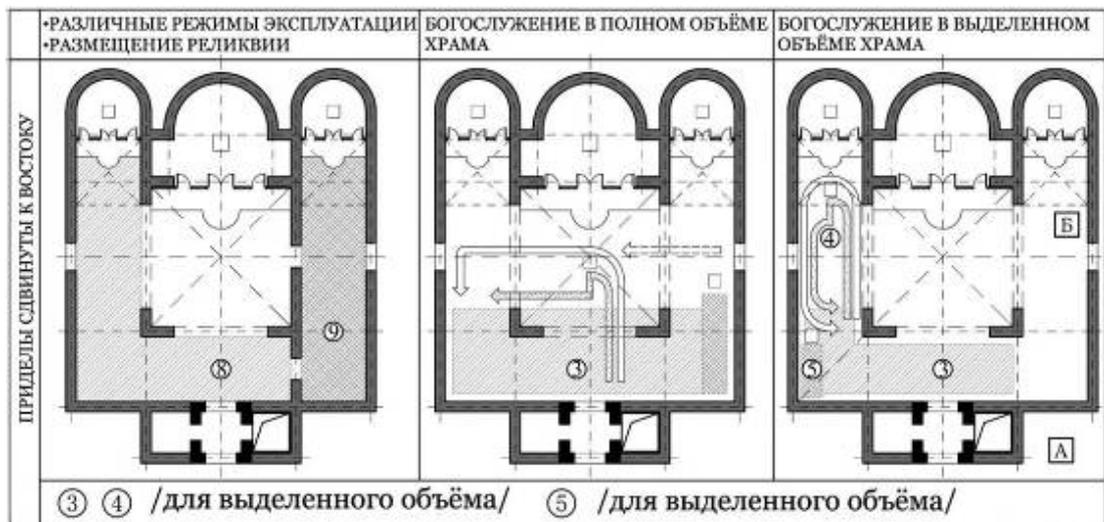


Рис. 4. Оценка проектного решения храма на основе функционально-планировочных факторов

Пути преодоления перечисленных недостатков, связанных с отдельными режимами эксплуатации частей храма, являются: устройство придела для ежедневного богослужения, по площади и взаимосвязям с помещениями храма, удовлетворяющего требованию автономного использования; устройство придела с соблюдением условий хранения для святыни – музейной ценности, не предназначенного для ежедневного богослужения, но соединенного со средней частью.

Особенностью объемно-планировочных композиций 1 (см. рис. 1 (а)), 3 (см. рис. 2 (а)), 5 (см. рис. 3 (а)) является то, что в них в наибольшей степени пересекаются пути перемещения прихожан во время таинств Причастия и Помазания елеем, а также подхода к Кресту. В данных храмах затруднено выделение места для «столика с запивкой», обязательного во время Таинства причастия, и пространственно изолированной зоны Таинства исповеди. Аналогичные недостатки присутствуют в пятом и шестом храмах при богослужении в отделенных объемах. Для объемно-планировочных композиций 1 (см. рис. 1 (а)), 3 (см. рис. 2 (а)), 5 (см. рис. 3 (а)), 6 (см. рис. 3 (б)) отмечены значительные, наименее удобные для прихожан и удаленные от амвона площади трапезных и притворов. В пятом (см. рис. 3 (а)) и шестом (см. рис. 3 (б))

храмах амвон расположен не в зоне прямой видимости прихожан, пребывающих в приделах, что затрудняет восприятие ими богослужения. Для объемно-планировочных композиций 1 (см. рис. 1 (а)), 3 (см. рис. 2 (а)), 5 (см. рис. 3 (а)) прихожане, уходящие из средней части храма до окончания богослужения, мешают значительному числу молящихся. Вместе с тем во втором (см. рис. 1 (б)), четвертом (см. рис. 2 (б)), пятом (см. рис. 3 (а)) и шестом (см. рис. 3(б)) храмах указанные недостатки сведены к минимуму. Данные храмы характеризуются развитием средней части в направлении север–юг за счет боковых притворов – объемно-планировочная композиция 2 (см. рис. 1 (б)); придела – объемно-планировочная композиция 4 (см. рис. 2 (б)), приделов и объединяющей их галереи или трапезной – объемно-планировочные композиции 5, 6, 7 (см. рис. 3, 4).

Исходя из особенностей рассмотренных композиционных решений храмов, путями преодоления функционально-планировочных недостатков являются: расширение средней части храма в направлении север–юг за счет боковых притворов или приделов; применение близких к квадрату пропорций средней части храма, не предусматривающих ее развитие на значительную глубину в западном направлении.

Выводы. Завершив анализ планировочных схем храмов, уточним содержание разработанных функционально-планировочных критериев оценки:

разделение и объединение (раздельные режимы эксплуатации) помещений храма при ежедневном и праздничном богослужении, возможность отделения для ежедневного богослужения меньшего по объему автономного помещения;

выделение пространственно изолированного, но имеющего связь с основным объемом храма помещения для размещения святыни – музейной ценности;

определение площади участков в храме, наиболее удаленных от амвона и наименее комфортных для прихожан;

определение пересечений путей передвижения прихожан во время богослужения, в том числе во время таинств Причастия, Помазания елеем, а также подхода к Кресту;

выделение пространственно изолированного места для проведения Таинства исповеди. Отметим, что метод построения планировочных схем храмов с нанесенными на них выделяемыми и объединенными помещениями, перемещениями прихожан, местами проведения Таинства исповеди позволяет провести комплексную оценку качества проектного решения в соответствии с функционально-планировочными критериями [8].

Проведенный анализ планировочных композиций храмов показал, что ни одна из них в полной мере не соответствует всем разработанным факторам оценки функционально-планировочных и объемных решений. Определены пути преодоления отмеченных функционально-планировочных недостатков, позволяющие формировать проектные решения храмов, опираясь на разработанную методику. Целесообразным представляется не копирование традиционных композиционных решений приходских храмов, а их осознанное исследование и создание объемно-планировочных композиций, в наибольшей степени отвечающих современным требованиям, при следовании «канонической традиции» отечественного храмостроения.

Некоторые аспекты рассмотренного подхода к проектированию применены автором в ряде проектов храмов в Подмосковье: Святого благоверного князя Александра Невского (Павлово-Слободский сельский округ, Истринский район, Московская область); Святого праведного Иоанна Кронштадтского (поселок Белые Столбы, Домодедовский район, Московская область).

Список литературы

1. Вагнер, Г.К. Канон и стиль в древнерусском искусстве / Г.К. Вагнер. – М.: Искусство, 1987. – 286 с.
2. Илларион (Троицкий), сщмч. Краугольный камень Церкви / Илларион (Троицкий). – URL: <http://pravbeseda.ru>.

3. Храм, обряды, богослужения / Православие и современность. Информационный портал Саратовской епархии РПЦ. – URL: <http://lib.eparhia-saratov.ru>.
4. Борисов, С.В. Традиции и новаторство в современном храмостроении / С.В. Борисов // Приволжский научный вестник. – 2013. – №4(20). – С. 92–97.
5. Борисов, С.В. Оптимизация проектных решений православных храмов на основе системы оценочных факторов / С.В. Борисов // Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ. – 2012. – С. 424–432.
6. Борисов, С.В. Архитектурные особенности действующих храмов, предназначенных для размещения объектов культурного наследия, переданных из музеев / С.В. Борисов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – №7(54). – С. 28–33.
7. Борисов, С.В. Современный подход к обеспечению сохранности объектов культурного наследия / С.В. Борисов // Наука и технологии в промышленности. – 2011. – №4. – С. 124–126.
8. Борисов, С.В. Объемно-планировочные принципы проектирования православных храмов Подмосковного региона / С.В. Борисов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата архитектуры. – М.: МАРХИ, 2012. – 35 с.

References

1. Wagner, G.K. Canon and style in the ancient Russian art / G.K. Wagner. – M.: Art, 1987. – 286 p.
2. Illarion (Troitsky). The cornerstone of the Church / Illarion (Troitsky). – Available at: <http://pravbeseda.ru>.
3. Temple, rituals, liturgy. Orthodoxy and modernity // Information portal of the Saratov diocese of the Russian Orthodox Church. – Available at: <http://lib.eparhia-saratov.ru>.
4. Borisov, S.V. Tradition and innovation in modern temple construction / S.V. Borisov // Privoljjsky Scientific Bulletin. – 2013. – №4(20). – P. 92–97.
5. Borisov, S.V. Optimization of design decisions Orthodox churches on the basis of the of system evaluating factors / S.V. Borisov // Science, education, and experimental design. Proceedings of the Moscow Institute of Architecture. – 2012. – P. 424–432.
6. Borisov, S.V. Architectural peculiarities of existing temples designed for layout of the cultural heritage objects delivered from museums / S.V. Borisov // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. – Irkutsk, 2011. – №47(54). – P. 28–33.
7. Borisov, S.V. The modern approach to the preservation of cultural heritage / S.V. Borisov // Science and technology in the industry. – 2011. – №4. – P. 124–126.
8. Borisov, S.V. Space-planning design principles of Orthodox churches Moscow region / S.V. Borisov // Autoabstract dissertation for the degree of candidate of architecture. – M.: Moscow Institute of Architecture, 2012. – 35 p.

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 338.45:69

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

Куимова Елена Ивановна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: lena-kui@mail.ru

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Стандартизация,
сертификация и аудит качества»
E-mail: loganin@mai.ru

Учаева Татьяна Владимировна,
аспирант кафедры «Экономика,
организация и управление производством»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Kuimova Helena Ivanovna,
Candidate of Sciences, Assistant Professor of
the department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: lena-kui@mail.ru

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Standardization, certification and
quality audit»
E-mail: loganin@mai.ru

Uchaeva Tatiana Vladimirovna,
Postgraduate of the department «Economics,
Organization and Management»

ВЫБОР ПОСТАВЩИКА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Е.И. Куимова, В.И. Логанина, Т.В. Учаева

Рассматриваются вопросы принятия решения о выборе поставщика на основе теории нечетких множеств. Приведены конкретные примеры выбора поставщика на предприятиях стройиндустрии.

Ключевые слова: критерии поставщика, весомость критерия, альтернативы, функция принадлежности к множеству.

SUPPLIER SELECTION BASED ON THE FUZZY SETS THEORY

H.I. Kuimova, V.I. Loganina, T.V. Uchaeva

The authors discuss the questions on choosing a supplier on the basis of fuzzy sets theory. They give examples of choosing a supplier in building industry enterprises.

Keywords: supplier criteria, criterion weight, alternatives, the set membership function.

Известно, что потенциал конкурентоспособности предприятия определяется в числе других факторов условиями его функционирования [1, 2], в том числе надежностью и ритмичностью поставок материальных ресурсов. Обычно организации взаимодействуют с несколькими поставщиками одного и того же материала. Задача выбора поставщика относится к многокритериальным задачам, основная идея которых состоит в том, чтобы множество важных параметров свести к единому показателю. Для выбора наилучшего из них сначала определяются основные критерии их оценки, к

основным из которых относятся: цена, надежность поставки, удаленность, сроки выполнения заказов, организация управления качеством, его финансовое положение, организация обучения и переподготовки персонала и пр.

В данной работе сделана попытка оценить поставщиков на примере производства бетона на предприятиях стройиндустрии г. Пензы ОАО «Завод ЖБК-1». В качестве показателей, характеризующих поставщика, были приняты: цена, качество поставляемого сырья, наличие свободной площади у поставщика сырья для увеличения мощности, надежность. Под надежностью понимается способность поставщика предоставить товар в оговоренные сроки, при этом необходимым условием является стабильность поставок. Были оценены поставщики цемента (ОАО «Вольскцемент» и ОАО «Мордовский цементный завод»).

Принятие решения основывается на теории нечетких множеств. Этот метод позволяет повысить обоснованность принимаемого решения и обеспечить выбор наиболее рационального варианта из нескольких допустимых.

Методика теории нечетких множеств позволяет оценить целесообразность работы с выбранным поставщиком при наличии всей необходимой информации, которая может быть обработана соответствующей информационной системой или несколькими экспертами. Экспертные оценки альтернативных вариантов по критериям могут быть представлены как нечеткие множества или числа, выраженные с помощью функций принадлежности. Для упорядочения нечетких чисел существует множество методов, которые отличаются друг от друга способом свертки и построения нечетких отношений.

При выборе поставщика цемента, лучшего по комплексу критериев качества, рассматриваем две альтернативы. Альтернативы обозначим как

a_1 – ОАО «Вольскцемент»

a_2 – ОАО «Мордовский цементный завод».

Рассмотрим последовательно этапы работы по обработке исходной информации.

I этап. Определение критериев оценки поставщика

Определены четыре критерия выбора:

F_1 — цена;

F_2 — качество;

F_3 — наличие свободных мощностей;

F_4 — надежность.

II этап. Определение конкретных значений функции принадлежности по всем критериям качества

Построение таких функций для всех альтернатив проводили эксперты, располагающие опытом в области сотрудничества с предприятиями рассматриваемого назначения (см. таблицу).

Значения функций принадлежности

Критерии	Альтернативы	
	a_1	a_2
F_1	0,7	0,7
F_2	0,8	0,5
F_3	0,4	0,6
F_4	0,8	0,8

III этап. Принятие решения

Нечеткие множества для четырех рассматриваемых критериев, включающие две анализируемые альтернативы, имеют следующий вид:

$$\mu_{F_i} = 0,7/a_1 + 0,7/a_2 ;$$

$$\mu_{F_2} = 0,8/a_1 + 0,5/a_2 ;$$

$$\mu_{F_3} = 0,5/a_1 + 0,9/a_2 ;$$

$$\mu_{F_4} = 0,8/a_1 + 0,8/a_2 .$$

Рассмотрим различные методики математической обработки мнений экспертов для принятия решения.

Если критерии, по которым осуществляется выбор альтернативы, имеют одинаковую важность для лица, принимающего решение, то правило выбора лучшей альтернативы имеет вид:

$$B = F_1 \cap F_2 \cap F_3 \cap F_4 .$$

Оптимальной считается альтернатива с максимальным значением функции принадлежности к множеству B . Операция пересечения нечетких множеств соответствует выбору минимального значения для j -й альтернативы:

$$\mu_B^n(a_j) = \min_j \mu_{F_i}(a_j) .$$

Для рассматриваемой задачи множество оптимальных альтернатив будет формироваться следующим образом:

$$B: \{ (\min(0, 7; 0, 8; 0, 5; 0, 8)); (\min(0, 7; 0, 5; 0, 9; 0, 8)) \} .$$

Результирующий вектор приоритетов альтернатив имеет следующий вид:

$$\max \mu_B(a_j) = \max \{0,5; 0,5\} .$$

Таким образом, наилучшей альтернативы пока выбрать нельзя.

Если критерии имеют различную значимость при определении наиболее рациональной альтернативы, методика расчета меняется. Необходимо определить весовые коэффициенты всех критериев. Один из возможных способов получения значений весовых коэффициентов заключается в построении матрицы C попарных сравнений критериев.

Элементы такой матрицы могут трактоваться по-разному, например,

- как качественная оценка

$$C = (c_{ij}) = \begin{cases} 2, & \text{если } F_i \text{ предпочтительней, чем } F_j; \\ 1, & \text{если } F_i \text{ и } F_j \text{ неразличимы;} \\ 0, & \text{если } F_j \text{ предпочтительней, чем } F_i. \end{cases}$$

- как аддитивная количественная оценка. Здесь c_{ij} показывает, на какую величину по некоторой балльной шкале один критерий предпочтительней другого;

- как мультипликативная количественная оценка. В этом случае c_{ij} – число, показывающее, во сколько раз критерий F_i предпочтительнее критерия F_j .

Для критериев, использованных при решении задачи выбора лучшего поставщика, экспертами составлена следующая матрица мультипликативных количественных оценок:

	F_1	F_2	F_3	F_4
F_1	1	1/2	3	1/2
F_2	2	1	3	1
F_3	1/3	1/3	1	1/2
F_4	2	1	2	1

$$\text{т.е. } C = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 3 & 1/2 \\ 2 & 1 & 3 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Весовой коэффициент критерия F_i определяется на основании вычисленных значений *правого собственного вектора* матрицы попарных сравнений α_i с последующим умножением на число критериев n .

$$\beta_i = \alpha_i \cdot n,$$

где β_i – весовой коэффициент критерия F_i .

Квадратная матрица C имеет не более 4 различных (возможно комплексных) собственных чисел и соответствующих им векторов. Если она неотрицательна и неразложима, то она имеет действительное и положительное собственное число, максимальное по модулю, которому соответствует единственный положительный собственный вектор.

Значения α_i и β_i приведены ниже:

	F_1	F_2	F_3	F_4
Значения α_i	0,404	0,655	0,21	0,604
Значения β_i	1,616	2,62	0,84	2,416

Множество оптимальных альтернатив B с учетом различной важности критериев качества определяется путем взвешенного пересечения нечетких множеств:

$$B = F_1 \beta_1 \cap F_2 \beta_2 \cap F_3 \beta_3 \cap F_4 \beta_4$$

$$\mu_B(a) = \max \mu_B(a_j)$$

Найдем множество оптимальных альтернатив с учетом полученных весовых коэффициентов:

$$B: \{(\min(0,7^{1,616}; 0,8^{2,62}; 0,5^{0,84}; 0,8^{2,416}); (\min(0,7^{1,616}; 0,5^{2,62}; 0,9^{0,84}; 0,8^{2,416}))\}$$

$$B: \{(\min(0,562; 0,557; 0,559; 0,583); (\min(0,562; 0,163; 0,915; 0,583))\}$$

Результирующий вектор приоритетов альтернатив имеет следующий вид:

$$\mu_B(a) = \max \{0,557; 0,163\}.$$

Таким образом, лучшей альтернативой является a_1 , которой соответствует значение 0,557, то есть предпочтение следует отдать Вольскому цементному заводу.

Следует отметить, что определить весовые коэффициенты критериев можно несколько проще, а именно:

- определяется сумма по каждой строке матрицы C , дающая вектор-столбец

$$\delta_i = \begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 13/6 \\ 6 \end{pmatrix};$$

▪ осуществляется нормирование элементов вектора делением на сумму его элементов $-\frac{121}{6}$, приводящее к весам.

В нашем случае расчет по такой методике дает результат: $\beta_i = \begin{pmatrix} 0,248 \\ 0,347 \\ 0,107 \\ 0,298 \end{pmatrix}$.

Справедливости ради следует отметить, что данная упрощенная методика расчета весов при первой попытке часто дает не вполне справедливые весовые коэффициенты. В таких случаях следует перерасчитать их с учетом косвенных предпочтений, скрытых в структуре матрицы попарных сравнений. Здесь при расчете весов β_i к элементам δ_i каждого критерия добавляются значения δ равных ему критериев и удвоенные значения δ тех критериев, которых он лучше (если таковые имеются).

Множество оптимальных альтернатив с учетом полученных весовых коэффициентов:

$$B: \{ (\min(0,915; 0,925; 0,929; 0,936)); (\min(0,915; 0,768; 0,989; 0,936)) \}$$

Результирующий вектор приоритетов альтернатив имеет следующий вид:

$$\mu_B(a) = \max\{0,915; 0,786\},$$

что подтверждает рациональность вывода о преимуществе альтернативы a_1 .

Список литературы

1. Логанина, В.И. Формирование организационно-экономического механизма управления потенциалом конкурентоспособности предприятий промышленности строительных материалов / В.И. Логанина, Б.Б.Хрусталева, Т.В.Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №1. – С.142–145.

2. Логанина, В.И. Разработка методики непрерывного улучшения деятельности организации на основе применения методов статистического управления процессами / В.И. Логанина, Т.В.Учаева, Т.С. Хананина // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2010. Т.11.– С.374–375.

3. Андрейчиков, А.В. Анализ, синтез, принятие решений / А.В.Андрейчиков. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 200 с.

References

1. Loganina, V.I. Formation of organizational and economic mechanism for potential competitiveness an industrial enterprises of building materials / V.I. Loganina V.B.Hrustalev, T.V.Uchaeva // Regional architecture and construction. – 2013. – № 1. – P.142–145.

2. Loganina. V.I. The methods of continuous improvement of organization activity by application of statistical process control / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva, T.S. Hananina // Proceedings of the International Symposium «The reliability and quality». – Penza, 2010. T.11. – P.374–375.

3. Andreychikov, A.V. Analysis, design, decisions / A.V. Andreychikov. – M.: Finances and Statistics, 2000. – 200 p.

Указатель статей, опубликованных в 2013 г.

1. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Полубояринов П.А., Давыдов Г.П., Князев В.А.** Новая технология предварительной физико-химической очистки сточных вод. – №3(17). – С. 110–116.
2. **Андреев С.Ю., Гришин Б.М., Исаева А.М., Бикунова М.В., Петрунин А.А.** К вопросу гидравлического расчета трубчатого гидродинамического флокулятора. – №1(15). – С. 107–114.
3. **Андреев С.Ю., Камбург В.Г., Петрунин А.А., Князев В.В., Давыдов Г.П.** Математическое моделирование кинетики процессов массопередачи из всплывающих газовых пузырьков в технологиях очистки сточных вод. – №3(17). – С. 137–142.
4. **Арутюнян И.А.** Инновационные подходы на основе систематизации развития строительного комплекса. – №1(15). – С. 167–173.
5. **Баканова С.В., Кубис В.А.** Предельно вероятностный метод оценки микроклимата в помещениях хранения скоропортящейся продукции. – №2(16). – С. 132–137.
6. **Бакушев С.В.** Упругопластический изгиб стержня с двумя осями симметрии распределённой нагрузкой. – №2(16). – С. 71–80.
7. **Береговой А.М., Мальцев А.В., Дерина М.А., Гречишкин А.В.** Эффект энергосбережения в помещении с естественной вентиляцией в условиях инфильтрации воздуха через наружную стену. – №3(17). – С. 143–147.
8. **Бирюзова Е.А.** Повышение энергоэффективности тепловых сетей за счет применения современных теплоизоляционных материалов. – №1(15). – С. 62–66.
9. **Бичевой П.П., Козырева Е.Н.** Оценка технологии восстановления гидроизолирующей пригодности многослойного кровельного покрытия битумно-полимерными композициями. – №1(15). – С. 28–34.
10. **Борисов С.В.** Традиционные планировочные решения православных приходских храмов: актуальность современного применения. – №3(17). – С. 171–176.
11. **Боровков Д.П., Бурба И.В., Чичиров К.О.** Повышение эффективности пылеуловителей на встречных закрученных потоках. – №3(17). – С. 160–166.
12. **Боровков Д.П., Чичиров К.О.** Системы аспирации с закруткой потока в воздуховодах. – №1(15). – С. 115–121.
13. **Будылина Е.А.** Моделирование систем: некоторые приложения уравнения Клейна – Гордона. – №2(16). – С. 98–102.
14. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Декомпозиция динамических систем в приложениях. – №3(17). – С. 97–102.
15. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Приближенные методы декомпозиции при настройке имитаторов динамических систем. – №3(17). – С. 153–159.
16. **Будылина Е.А., Данилов А.М., Гарькина И.А.** Моделирование с позиций управления в технических системах. – №2(16). – С. 138–142.
17. **Вдовин В.М., Мухаев А.И., Аriskин М.В.** К оценке напряженно-деформированного состояния деревянных элементов, соединенных центровыми вклеенными шпонками. – №2(16). – С. 81–90.
18. **Вернигорова В.Н., Саженко Д.С.** Вода затворения как микрогетерогенная организованная среда. – №2(16). – С. 32–35.
19. **Вернигорова В.Н., Саженко Д.С., Вернигоров М.М.** Морфология поверхности гидросиликатов кальция. – №2(16). – С. 62–65.
20. **Вилкова Н.Г., Еланева С.И., Шумкина А.А., Дорчина О.В.** Очистка сточных вод: перспективы использования структурированных дисперсных систем. – №2(16). – С. 115–119.
21. **Гаврилов М.А., Вернигорова В.Н.** Композиционные материалы на основе эпоксидной смолы. – №2(16). – С. 50–56.
22. **Гарькина И.А., Данилов А.М., Хнаев О.А.** Управление качеством динамической системы: селекция информативных сигналов. – №1(15). – С. 137–141.

-
23. **Горшков В.И., Мирошниченко Д.С., Святкина А.А., Тараканов О.В.** Прогнозирование отказов вентиляционных систем. – №2(16). – С. 125–131.
24. **Грабовый П.Г., Матвеев М.С.** Перспективные направления развития инвестиционно-строительного комплекса г. Пензы на основе маркетинговых подходов. – №2(16). – С. 159–163.
25. **Гришин Б.М., Андреев С.Ю., Салмин С.М.** Закономерности изменения гидравлического сопротивления крупнозернистой контактной загрузки при фильтровании водной суспензии. – №3(17). – С. 124–130.
26. **Гришин Б.М., Кошев А.Н., Ласьков Н.Н., Бikuнова М.В.** Удаление соединений азота из сточных вод с применением окислителей. – №2(16). – С. 91–97.
27. **Гучкин И.С., Булаченко В.О.** Оценка физического состояния эксплуатируемых балок по фиксированным значениям прогиба, ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами. – №1(15). – С. 96–99.
28. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Образовательная система с позиций идентификации и управления. – №2(16). – С. 143–146.
29. **Данилов А.М., Круглова А.Н., Селяев В.П.** Управление качеством эпоксидных композиционных материалов на основе аппретирования. – №2(16). – С. 13–19.
30. **Демьянова В.С., Гусев А.Д.** Ресурсосберегающая технология получения отечественной строительной черепицы. – №1(15). – С. 80–83.
31. **Елькина О.В., Дмитриева Н.Н.** Синергия исторически сложившегося архитектурного центра в синергетике города. – №3(17). – С. 167–170.
32. **Ерофеев В.Т., Родин А.И.** Биостойкость декоративных цементных композитов. – №3(17). – С. 33–39.
33. **Ерошкина Н.А., Коровкин М.О.** Механизм твердения геополимерных вяжущих на основе магматических горных пород. – №3(17). – С. 51–56.
34. **Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Аксенов С.В.** Влияние минерального состава магматических горных пород на активность геополимерного вяжущего. – №1(15). – С. 84–89.
35. **Иванченко В.Т., Петриченко А.Н.** Система энергоснабжения автономных зданий усадебного типа. – №3(17). – С. 117–123.
36. **Иващенко А.М., Калашников В.И., Каргин А.А.** Вариантный и комбинированный методы анализа устойчивости колонн в стойках каркасов зданий. – №1(15). – С. 100–106.
37. **Иноземцев С.С., Гришина А.Н., Королев Е.В.** Модель комплексного наноразмерного модификатора для асфальтобетонов. – №3(17). – С. 15–22.
38. **Калашников В.И., Тараканов О.В., Белякова Е.А., Мороз М.Н.** Новые направления использования зол ТЭЦ в порошково-активированных бетонах нового поколения. – №3(17). – С. 23–28.
39. **Комаров В.А., Болдырева О.В., Жуков А.Н.** Консольные опоры железобетонных ригелей при совместном действии вертикальных сил и опорного изгибающего момента. – №3(17). – С. 131–136.
40. **Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Саденко Д.С.** Влияние способа введения суперпластификатора на его водоредуцирующий эффект. – №2(16). – С. 66–70.
41. **Королев Е.В.** Техничко-экономическая эффективность и перспективные строительные материалы. – №3(17). – С. 9–14.
42. **Королева Т.И., Грейсух Г.И., Степанов С.А., Иващенко Н.Ю.** Нетрадиционная энергетика в теплоснабжении (на примере объектов Пензенской области). – №3(17). – С. 148–152.
43. **Королева Т.И., Салмин В.В., Ежов Е.Г., Иващенко Н.Ю.** Опыт регулирования теплопотребления путем модернизации индивидуального теплового пункта. – №2(16). – С. 109–114.
44. **Круглов Ю.В., Стецурина Е.С.** «Скорость сообщения» в анализе закономерностей расселения населения. – №1(15). – С. 122–127.
45. **Кузин Н.Я., Толстых Ю.О., Арефьева М.С.** Управление энергосбережением – российский и зарубежный опыт. – №1(15). – С. 152–157.

46. **Куимова Е.И., Логанина В.И., Учаева Т.В.** Выбор поставщика на основе теории нечетких множеств. – №3(17). – С. 177–178.
47. **Ласьков Н.Н.** Экспериментальная теория сопротивления стен при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил. – №1(15). – С. 90–95.
48. **Леснов В.В., Ерофеев В.Т.** Влияние вида металлической дисперсной арматуры на характер работы в цементной матрице каркасного бетона. – №1(15). – С. 23–27.
49. **Леснов В.В., Ерофеев В.Т.** Свойства матричных и клеевых композиций каркасных бетонов, модифицированных полиакрилнитриловой фиброй. – №1(15). – С. 18–22.
50. **Логанина В.И., Акжигитова Э.Р.** Оценка гидрофизических свойств покрытий на основе сухих строительных смесей с применением минеральных и органоминеральных добавок. – №2(16). – С. 20–25.
51. **Логанина В.И., Симонов Е.Е.** Теплоизоляционные сухие строительные смеси с применением диатомита. – №1(15). – С. 52–56.
52. **Логанина В.И., Тарасов Р.В., Симонов Е.Е.** Теплоизоляционные сухие строительные смеси с применением модифицированного диатомита. – №1(15). – С. 75–79.
53. **Мазявкина В.Д., Круглов Ю.В.** Оценка транспортных потоков улично-дорожной сети города с использованием метода экстраполяции. – №1(15). – С. 128–136.
54. **Макридин Н.И., Скачков Ю.П., Максимова И.Н., Суков И.А.** Комплексная оценка механического поведения заполнителей бетона из горных пород. Часть 2. Идентификация процесса разрушения. – №2(16). – С. 4–12.
55. **Макридин Н.И., Тараканов О.В., Максимова И.Н., Суков И.А.** Фактор времени в формировании фазового состава структуры цементного камня. – №2(16). – С. 26–31.
56. **Мальцев А.В., Береговой А.М., Береговой В.А., Дерина М.А.** Влияние теплопроводности материала наружных ограждений в стадии увлажнения и промерзания на энергоэффективность зданий. – №1(15). – С. 57–61.
57. **Мышкин А.В., Ерофеев В.Т.** Оптимизация составов полиэфиракрилатных композитов. – №3(17). – С. 57–62.
58. **Нежданов К.К., Антонов С.А.** Конструкция спирального виадука. – №3(17). – С. 88–92.
59. **Нежданов К.К., Кузьмишкин А.А., Гарькин И.Н.** Применение двухстенчатых подкрановых балок с амортизирующим эффектом. – №3(17). – С. 93–96.
60. **Низина Т.А., Балбалин А.В.** Механическая активация цементных смесей с полифункциональными добавками. – №2(16). – С. 36–42.
61. **Низина Т.А., Кочетков С.Н.** Оптимизация составов наномодифицированных цементных вяжущих. – №1(15). – С. 35–41.
62. **Низина Т.А., Кочетков С.Н., Пономарев А.Н., Козеев А.А.** Оценка эффективности влияния наномодификаторов на прочностные и реологические характеристики цементных композитов в зависимости от вида пластифицирующих добавок. – №2(16). – С. 43–49.
63. **Обухов И.А., Москалец П.В.** Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. – №2(16). – С. 120–124.
64. **Петрянина Л.Н., Карпова О.В.** Создание системы менеджмента качества в проектной организации. – №1(15). – С. 162–166.
65. **Прохоров С.Г., Кожунов А.А., Родионов Ю.В.** Повышение энергоэффективности котлов малой мощности путем подогрева дутьевого воздуха. – №2(16). – С. 103–108.
66. **Резник Г.А., Малышев А.А.** Эколого-экономический фактор как критерий оценки благосостояния населения пензенского региона. – №1(15). – С. 146–151.
67. **Романенко И.И., Петровнина И.Н., Пинт Э.М., Романенко М.И.** Коррозионная стойкость шлакощелочных бетонов в органических средах. – №1(15). – С. 42–51.
68. **Селяев В.П., Данилов А.М., Круглова А.Н.** Оценка свойств модифицированных эпоксидных композитов по параметрам акустической эмиссии. – №1(15). – С. 67–74.
69. **Селяев В.П., Лукин А.Н., Колотушкин А.В.** Цементные композиции для высокопрочных бетонов. – №3(17). – С. 4–8.

-
70. **Селяев В.П., Неверов В.А., Куприяшкина Л.И., Колотушкин А.В., Сидоров В.В.** Микроструктура перспективных теплоизоляционных материалов на основе диатомитов Среднего Поволжья. – №1(15). – С.12–17.
71. **Селяев В.П., Ошкина Л.М., Селяев П.В., Сорокин Е.В.** Исследование химической стойкости цементных бетонов с учетом сульфатной коррозии. – №1(15). – С. 4–11.
72. **Селяев В.П., Соловьев А.А., Парамонов Р.Н., Алимов М.Ф., Шабаев И.Н.** Работа балок, армированных композитной стеклопластиковой арматурой. – №3(17). – С. 69–75.
73. **Скачков Ю.П., Снежкина О.В., Кочеткова М.В., Корнюхин А.В.** Определение схем разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок по экспериментальным данным. – №3(17). – С. 76–83.
74. **Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Сколубович А.Ю.** Исследования сорбционных фильтрующих материалов в технологиях очистки природных вод. – №3(17). – С. 103–109.
75. **Туманов В.А., Абрашитов В.С., Туманов А.В., Абрашитов Н.В.** Натурные испытания подстропильной стальной фермы пролетом 12 м. – №3(17). – С. 84–87.
76. **Тюкленкова Е.П., Пресняков В.В.** Составление схемы функционального зонирования сельского населённого пункта на примере рабочего посёлка Золотарёвка Пензенской области. – №1(15). – С. 158–161.
77. **Федорцов А.П., Федорцов В.А.** О потенциале свойства материала и его изменении. – №3(17). – С. 40–46.
78. **Фокин Г.А., Гуськов А.С.** Ускорение реакции твердения вяжущего низкочастотным ультразвуковым полем. – №3(17). – С. 63–68.
79. **Фокин Г.А., Тетюшева О.В., Гуськов А.С.** Влияние низкочастотных ультразвуковых колебаний малой мощности на дисперсные среды. – №2(16). – С. 57–61.
80. **Хрусталеv Б.Б., Ганиев М.Г.** Формирование стратегии развития предприятий сферы жилищно-коммунального хозяйства на основе использования маркетингового подхода. – №2(16). – С. 153–158.
81. **Хрусталеv Б.Б., Логанина В.И., Учаева Т.В.** Параметры оценки деятельности промышленных предприятий строительных материалов по данным маркетинга. – №2(16). – С. 147–152.
82. **Хрусталеv Б.Б., Логанина В.И., Учаева Т.В.** Формирование организационно-экономического механизма управления потенциалом конкурентоспособности предприятий промышленности строительных материалов. – №1(15). – С. 142–145.
83. **Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В.** Алгоритм проектирования состава вибропоглощающего композита. – №3(17). – С. 29–32.
84. **Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В.** Вибропоглощающие покрытия, эффективно работающие в широком диапазоне температур. – №3(17). – С. 47–50.