

ISSN 2072-2958

# АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

2014 №1(18)

РЕГИОНАЛЬНАЯ

www.pguas.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства



ПГУАС

**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 05.03.2014.  
Формат 60x84 1/8.  
Уч.-изд.л. 22,5. Тираж 500 экз. Первый завод 100.  
Заказ № 62.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ  
АРХИТЕКТУРА  
И СТРОИТЕЛЬСТВО**  
1(18)/2014

**Содержание**

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ИЗДЕЛИЯ** ..... 4

**Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И.,  
Осипов А.К.**  
**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ МОДИФИКАЦИИ  
ДИАТОМИТА НА ЕГО ФИЗИКО-  
ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** ..... 4

**Назирев Р.А., Волков А.Н.**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛОЕМКИХ  
БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ  
ТЕМПЕРАТУР НАРУЖНОГО ВОЗДУХА** ..... 12

**Мороз М.Н., Калашников В.И.,  
Суздальцев О.В., Янин В.С.**  
**ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ДЕКОРАТИВНО-ОТДЕ-  
ЛОЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТНО-ГИДРОФОБИЗИ-  
РОВАННЫЕ БЕТОНЫ**..... 18

**Калашников В.И., Белякова Е.А.,  
Тараканов О.В., Москвин Р.Н.**  
**ВЫСОКОЭКОНОМИЧНЫЙ  
КОМПОЗИЦИОННЫЙ ЦЕМЕНТ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОЛЫ-УНОСА** ..... 24

**Гарькина И.А., Данилов А.М., Жегера К.В.**  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ  
В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ МАТЕРИАЛОВ**... 30

**Вернигорова В.Н., Вернигоров М.М.,  
Саденко Д.С.**  
**МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ**..... 37

**Данилов А.М., Селяев В.П., Круглова А.Н.**  
**СТРУКТУРА НАПОЛНЕННОГО  
ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО.  
ОПТИЧЕСКАЯ И СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ  
МИКРОСКОПИЯ**..... 41

**Тараканов О.В., Белякова Е.А., Горшков В.И.**  
**ПРОТИВОМОРОЗНЫЕ ДОБАВКИ  
НА ОСНОВЕ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ,  
МИНЕРАЛЬНЫХ И УСКОРЯЮЩИХ  
МОДИФИКАТОРОВ**..... 53

**Логанина В.И., Жегера К.В.**  
**ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ  
АЛЮМОСИЛИКАТОВ В РЕЦЕПТУРЕ  
ПЛИТОЧНОГО КЛЕЯ**..... 59

© Авторы публикаций, 2014  
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2014  
© ПГУАС, 2014

<b>Гусев Н.И., Паршина К.С., Кочеткова М.В.</b> ПОЛЫ С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ КАЧЕСТВАМИ.....	64	<b>Гусев Н.И., Кочеткова М.В., Паршина К.С.</b> ИЗ ОПЫТА РЕСТАВРАЦИИ СТАРЫХ ЗДАНИЙ.....	128
<b>Демьянова В.С., Гусев А.Д., Денисова Н.А.</b> ГИБКАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ ЧЕРЕПИЦА ИЗ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН.....	69	<b>Нежданов К.К., Кузьмишкин А.А., Гарькин И.Н.</b> СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ КРАНОВЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ КРУЧЕНИИ.....	132
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ .....	72	<b>Зернов В.В., Зайцев М.Б.</b> ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	136
<b>Скачков Ю.П., Корнюхин А.В., Снежкина О.В., Кочеткова М.В.</b> ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РОСТВЕРКОВ.....	72	ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ.....	144
<b>Кочеткова М.В., Гусев Н.И., Снежкина О.В., Паршина К.С.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ РОСТВЕРКОВ.....	77	<b>Пляцук Л.Д., Гурец Л.Л.</b> МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОРА ПЫЛЕГАЗООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	144
<b>Бакушев С.В.</b> ПЛОСКАЯ ЗАДАЧА ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ – РЕШЕНИЕ В НАПРЯЖЕНИЯХ.....	82	<b>Трошин А.Г., Камбург В.Г.</b> ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ОТЖИМА ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО УРОВНЮ СОДЕРЖАНИЯ ПЛЕНОЧНОЙ ВЛАГИ.....	150
<b>Шеин А.И., Завьялова О.Б.</b> ПРИБЛИЖЁННЫЙ СПОСОБ РАСЧЁТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОЭТАЖНЫХ РАМ.....	89	<b>Горшков В.И., Святкина А.А., Мирошниченко Д.С., Тараканов О.В.</b> ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА ВОЗДУХА В СИСТЕМЕ ВЕНТИЛЯЦИИ.....	156
<b>Шеин А.И., Шмелев Д.А.</b> ПОСТРОЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕАКТИВНЫХ ГАСИТЕЛЕЙ .....	96	<b>Баканова С.В., Еремкин А.И.</b> РЕФРИЖЕРАТОРНЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ .....	162
<b>Гарькина И.А., Данилов А.М., Гарькин И.Н.</b> КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	104	АРХИТЕКТУРА.....	166
<b>Тарасов Д.А., Коновалов В.В., Зайцев В.Ю.</b> КОНСТРУКЦИЯ ЗАЩИТНОГО СООРУЖЕНИЯ ОТ УДАРА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДОВ .....	111	<b>Приемец О.Н.</b> РАЗВИТИЕ АРХИТЕКТУРНОГО ОРНАМЕНТА В ЗОДЧЕСТВЕ АЛМАТЫ КОНЦА XIX – НАЧАЛА XX ВЕКА.....	166
<b>Снежкина О.В., Кочеткова М.В., Корнюхин А.В., Ладин Р.А.</b> РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК СО СРЕДНИМ ПРОЛЕТОМ СРЕЗА .....	118	ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ .....	170
<b>Мальцев А.В., Береговой А.М., Береговой В.А., Дерина М.А.</b> НАРУЖНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ, УТИЛИЗИРУЮЩЕЕ ТЕПЛО УХОДЯЩЕГО ВОЗДУХА ИЗ ПОМЕЩЕНИЯ .....	123	<b>Логанина В.И., Учаева Т.В., Бахтеева А.А.</b> ВЫБОР ПОСТАВЩИКОВ СЫРЬЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ .....	170
		<b>Горелов А.М., Орлов Н.А., Власов А.А.</b> КАЛИБРОВКА МИКРОСКОПИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ ГОРОДОВ .....	175

# Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS .....	4	<b>Garkina I.A., Danilov A.M., Garkin I.N.</b> CORRELATION AND SPECTRAL METHODS IN MONITORING COMPLEX DESIGNS.....	104
<b>Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K.</b> INFLUENCE OF DIATOMITE MODIFICATION CONDITIONS ON ITS PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES.....	4	<b>Tarasov D.A., Kononov V.V., Zaitsev V.Y.</b> PROTECTIVE STRUCTURE CONSTRUCTION FROM STROKE FOR RAILROAD CROSSINGS .....	111
<b>Nazirov R.A., Volkov A.N.</b> THE RESEARCH OF THERMAL HEAT STORAGE CONCRETES BEHAVIORAL PATTERNS IN THE CONDITIONS OF TRANSIENT OUTSIDE AIR TEMPERATURE .....	12	<b>Snezhkina O.V., Kochetkova M.V., Kornuhin A.V., Ladin R.A.</b> STRENGTH CALCULATING OF REINFORCED CON- CRETE BEAMS WITH MIDDLE SHEAR SPAN.....	118
<b>Moroz M.N., Kalashnikov V.I., Suzdaltsev O.V., Yanin V.S.</b> HIGH-STRENGTH DECORATIVE AND FINISHING HYDROPHOBIC CONCRETE.....	18	<b>Maltsev A.V., Beregovoy A.M., Beregovoy V.A., Derina M.A.</b> ENCLOSURE STRUCTURES UTILIZING REMOVED ROOM AIR HEAT .....	123
<b>Kalashnikov V.I., Belyakova E.A., Tarakanov O.V., Moskvina R.N.</b> HIGHLY ECONOMICAL COMPOSITE CEMENT USING FLY ASH .....	24	<b>Gusev N.I., Kochetkova M.V., Parshina K.S.</b> EXPERIENCE IN RESTORATION OLD BUILDINGS .....	128
<b>Garkina I.A., Danilov A.M., Zhegera Ch.V.</b> MATHEMATICAL PROGRAMMING IN MANAGING THE MATERIAL QUALITY .....	30	<b>Nezhdanov K.K., Kuzmishkin A.A., Garkin I.N.</b> METHOD OF INCREASING THE MOMENTS OF INERTIA CRANE RAIL TORSIONAL.....	132
<b>Vernigorova V.N., Vernigorov M.M., Sadenko D.S.</b> SURFACE MORPHOLOGY OF CALCIUM HYDROSILICATES .....	37	<b>Zernov V.V., Zaitsev M.B.</b> THE STRESS FIELD IN THE HEAT-AFFECTED ZONE OF WELDED JOINTS .....	136
<b>Danilov A.M., Seljaev V.P., Kruglova A.N.</b> THE STRUCTURE OF FILLED EPOXY BINDER. OPTICAL AND SCANNING PROBE MICROSCOPY .....	41	ENGINEERING SYSTEMS .....	144
<b>Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Gorshkov V.I.</b> ANTIFREEZE ADDITIVES BASED ON SUPERPLASTICIZERS, MINERAL AND ACCELERATING MODIFIERS.....	53	<b>Plyatsuk L.D., Gurets L.L.</b> RESEARCH METHODOLOGY AND CHOICE OF DUST AND DAS CLEANING EQUIPMENT.....	144
<b>Loganina V.I., Zhegera Ch.V.</b> APPLICATION OF SYNTHESIZED ALUMINOSILI- CATE IN TILE ADHESIVE FORMULATIONS.....	59	<b>Troshin A.G., Kamburg V.G.</b> ASSESSMENT AND FORECAST FOR CONTROL OF THE PROCESS OF CENTRIFUGAL EXTRACTION OF GRANULAR MATERIALS BY THE CONTENTS OF A FILM MOISTURE ...	150
<b>Gusev N.I., Parshina K.S., Kochetkova M.V.</b> FLOORS WITH IMPROVED QUALITIES .....	64	<b>Gorshkov V.I., Svyatkina A.A., Miroshnichenko D.S., Tarakanov O.V.</b> CHOICE OF GASDYNAMICAL AIR FLOW REGULATOR PARAMETERS IN THE VENTILATION SYSTEM .....	156
<b>Demyanova V.S., Gusev A.D., Denisova N.A.</b> FLEXIBLE CONSTRUCTION TILES FROM WORN-OUT TIRES .....	69	<b>Bakanova S.V., Eremkin A.I.</b> AIR COOLING IN REFRIGERATED PREMISES, EQUIPPED WITH VERTICAL AIR DISTRIBUTION SYSTEM .....	162
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	72	ARCHITECTURE.....	166
<b>Skachkov Y.P., Kornuhin A.V., Snezhkina O.V., Kochetkova M.V.</b> EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE GRILLAGE .....	72	<b>Priemets O.N.</b> DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL ORNAMENT IN ARCHITECTURE OF ALMATY LATE IN XIX – EARLY XX CENTURY .....	166
<b>Kochetkova M.V., Gusev N.I., Snezhkina O.V., Parshina K.S.</b> EXPERIMENTAL EVALUATION OF GRILLAGES WORK.....	77	ECONOMICS AND MANAGEMENT .....	170
<b>Bakushev S.V.</b> PLAIN TASK OF PHYSICALLY NON-LINEAR THEORY OF ELASTICITY – SOLUTION IN STRESSES.....	82	<b>Loganina V.I., Uchaeva T.V., Bakhteeva A.A.</b> SELECTION OF RAW MATERIALS SUPPLIERS DEPENDING ON PRODUCTION CONDITION..	170
<b>Shein A.I., Zavalova O.B.</b> APPROXIMATE METHOD OF CALCULATION MULTISTOREY FRAMES ON STABILITY .....	89	<b>Gorelov A.M., Orlov N.A., Vlasov A.A.</b> CALIBRATION OF MICROSCOPIC MODELS OF TRANSPORT STREAM IN PROBLEMS OF CITIES TRANSPORT PLANNING .....	175
<b>Shein A.I., Shmelev D.A.</b> CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF MATHEMATICAL MODEL OF HIGH-RISE BUILDINGS VIBRATION DAMPING BY REACTIVE DAMPERS.....	96		

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 662.998-492

*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», президент  
Научно-технического общества строителей  
Республики Мордовия  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Седова Анна Алексеевна**,  
кандидат химических наук, доцент

**Куприяшкина Людмила Ивановна**,  
кандидат технических наук, профессор

**Осипов Анатолий Константинович**,  
кандидат химических наук, доцент

*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», President of Scientific and  
Technical Society of the Mordovia Republic  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Sedova Anna Alekseevna**,  
Candidate of chemical Sciences, Associate  
Professor

**Kupriyashkina ludmila Ivanovna**,  
Candidate of Sciences, Professor

**Osipov Anatoliy Konstantinovich**,  
Candidate of chemical Sciences, Associate  
Professor

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ МОДИФИКАЦИИ ДИАТОМИТА НА ЕГО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА\*

В.П. Селяев, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина, А.К. Осипов

Предложены методы модификации Атемарского диатомита обработкой породы хлористоводородной кислотой различной концентрации. Установлен химический состав диатомита до и после обработки кислотой. Определены физико-химические свойства модифицированного диатомита.

*Ключевые слова: диатомит, модификация, физико-механические свойства, концентрация кислоты, микрокремнезем, ИК-спектр.*

\* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-08-97172, 13-08-97178.



## INFLUENCE OF DIATOMITE MODIFICATION CONDITIONS ON ITS PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

V.P. Selyaev, A.A. Sedova, L.I. Kupriyashkina, A.K. Osipov

The authors offer methods of Atemarsky diatomite modification by its processing with hydrochloric acid of different concentrations. Chemical composition of diatomite is defined before and after acid treatment. Physicochemical properties of the modified diatomite are determined.

*Keywords: diatomite, modification, of physico-mechanical, properties, concentration of acid, microsilica, IK spectrum.*

Современные технологии производства строительных материалов на цементном вяжущем предусматривают широкое применение тонкодисперсных порошков микрокремнезема. Микрокремнезем содержится в большом количестве в диатомитах, которые состоят из аморфного коллоидного кремнезема, образованного путем диффузионного осаждения диатомитовых водорослей. Порошки из аморфного кремнезема можно использовать в качестве теплоизоляционного материала, как сорбент в нефтяной, пищевой и химической промышленности, в качестве фильтров для очистки питьевой и сточных вод, для получения жидкого стекла и т.д. Поэтому задача получения из диатомита микрокремнезема, пригодного для улучшения качества строительных материалов, является актуальной.

В настоящей работе рассмотрены способы химической модификации диатомитов с целью очистки аморфного кремнезема от примесей, содержащихся в природном диатомите [1, 2, 3].

Исследования проводились на образцах природного Атемарского диатомита, которые предварительно хорошо измельчали, растирали в фарфоровой ступке до состояния пудры, высушивали при температуре 200 °С до постоянной массы. На аналитических весах отвешивали навеску образца примерно 1,000 г. Для удаления примесей диатомит обрабатывали раствором HCl различной концентрации. Смесь нагревали на песчаной бане. Не растворившийся остаток отделяли фильтрованием через неплотный беззольный фильтр (белая лента), фильтрат собирали и анализировали на содержание ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  методом ионной хроматографии с помощью ионного анализатора модели PIA-1000, предварительно отделив полуторные оксиды.

Концентрацию ионов  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$  в фильтрате измеряли на атомно-абсорбционном спектрофотометре Shimadzu серии AA-7000. ИК-спектры образцов диатомита после двукратной обработки раствором HCl снимали на спектрометре ИК – Фурье IRAffinity-1. Размер частиц модифицированного диатомита определяли с помощью оптического микроскопа Nikon LV-150. Определение структуры образцов диатомита проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6. Термогравиметрические кривые модифицированного кремнезема снимали на устройстве термогравиметрического и дифференциально-термического анализа TGA/SDTA 851<sup>с</sup>. Теплопроводность диатомита изучали на измерителе теплопроводности ИТС-1. Элементный анализ и исследование структуры природного и модифицированного диатомита осуществляли на многофункциональном растровом электронном микроскопе с интегрированной системой фокусированного ионного пучка Quanta 200i 3D FEI.

Породы диатомита – в основном трехкомпонентные системы. Наряду с кремнистой составляющей в них постоянно присутствует глинистый материал. В типичных диатомитах содержание кремнезема составляет 60–80 % (редко больше), глинистого материала – от 20 до 40 %. В качестве постоянной примеси в различном количестве присутствуют также обломочный песчано-алевритовый кварц, глауконит и др.

Атемарский диатомит (Республика Мордовия) представляет собой сцементированную породу светло-серого цвета. Относится к кислым породам, нерастворим в кислотах (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>), однако обработкой породы кислотой, при определенных условиях, удается отмыть ее от некоторых примесей, что должно отразиться на свойствах диатомита.

Прежде всего были определены: влажность, потери при прокаливании, растворимость в воде и химический состав образца диатомита. Результаты представлены в табл. 1, 2, 3.

Результаты анализа Атемарского диатомита ( $n=3$ ;  $t_{p,f}=4,3$ ;  $p=0,95$ )

Определяемые параметры	$\omega (\%) \pm \frac{t_{p,f} \cdot S}{\sqrt{n}}$
Влажность	$5,78 \pm 0,26$
Потери при прокаливании	$8,73 \pm 0,11$
Водорастворимые вещества	$0,63 \pm 0,04$

Т а б л и ц а 2

Результаты определения растворимости в HCl

Навеска диатомита, г	Масса осадка, г	Масса осадка после повторной обработки HCl, г	$\omega, \%$ растворимых веществ	Концентрация HCl, моль/л
1,0083	0,8310	0,7258	28,25	1
1,0050	0,7758	0,6765	32,85	2
1,0013	0,7581	0,6699	33,14	4
1,0077	0,8025	0,6846	32,31	6

Т а б л и ц а 3

Результаты химического анализа Атемарского диатомита ( $n=3$ ;  $t_{p,f}=4,3$ ;  $p=0,95$ )

Определяемые параметры	$\omega (\%) \pm \frac{t_{p,f} \cdot S}{\sqrt{n}}$
SiO <sub>2</sub>	$79,50 \pm 0,35$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$3,36 \pm 0,14$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$4,01 \pm 0,24$
TiO <sub>2</sub>	$1,47 \pm 0,07$
CaO	$2,54 \pm 0,04$
MgO	$1,49 \pm 0,05$
п.п.п	$7,63 \pm 0,13$

Затем определены оптимальные временные условия для более полного удаления примесей. Результаты представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Результаты анализа модифицированного диатомита после обработки 2 М раствором HCl в течение различного времени

Время, ч	Масса навески диатомита, г	Масса фильтра, г	Масса фильтра с осадком, г	Масса осадка, г	Масса растворенных веществ, г
				$x \pm \frac{t_{p,f} \cdot S}{\sqrt{n}}$	
0,5	1,0081	0,6659	1,6084	$0,9425 \pm 0,003$	$0,0658 \pm 0,004$
1	1,0030	0,6657	1,5570	$0,8913 \pm 0,005$	$0,1117 \pm 0,003$
1,5	1,0048	0,6661	1,5780	$0,9119 \pm 0,003$	$0,0929 \pm 0,002$
2	1,0042	0,6658	1,5487	$0,8829 \pm 0,004$	$0,1213 \pm 0,002$

Из табл. 4 видно, что для удаления примесей из породы достаточно ее обработать 2 М раствором HCl и нагревать в течение 1 часа. Для более полного выделения примесей проводили двукратную обработку навески образца породы. Фильтрат отделяли от остатка породы и анализировали на содержание ионов Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> методом ионной хроматографии. Нерастворившийся остаток породы анализировали на содержание SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O гравиметрическим методом после трехкратной обработки смесью HF + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Результаты анализа представлены в табл. 5, 6, 7.

Результаты анализа модифицированного диатомита на содержание  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 

Навеска диатомита, г	Масса тигля с породой, г	Масса тигля с породой после обработки смесью $\text{H}_2\text{SO}_4$ и $\text{HF}$ , г	$\omega$ , %, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
1,0056	19,1624	18,3918	76,63
1,0012	17,8672	17,1336	73,27

Т а б л и ц а 6

Анализ фильтрата после обработки природного диатомита 2 М раствором соляной кислоты и модифицированного диатомита методом ионной хроматографии

№ п/п	Катион	Площадь пика		Время выхода, мин		С, мкг/л	С, мг	$\omega$ , %	$\omega$ , % оксида
		станд.	иссл.	станд.	иссл.				
Первичная обработка	$\text{Mg}^{2+}$	527747	64805	12,42	12,35	614,0	1,535	0,062	0,103
	$\text{Ca}^{2+}$	287030	49923	9,25	9,01	869,6	2,174	0,088	0,123
Повторная обработка	$\text{Mg}^{2+}$	527747	23703	12,42	12,30	224,6	0,562	0,023	0,038
	$\text{Ca}^{2+}$	287030	10081	9,25	9,04	175,6	0,439	0,018	0,025
Диатомит модифиц.	$\text{Mg}^{2+}$	527747	1156154	12,42	12,16	10005,7	1,001	0,051	0,085
	$\text{Ca}^{2+}$	287030	1407771	9,25	9,07	24523,0	2,452	0,125	0,175

Т а б л и ц а 7

Результаты анализа фильтрата после обработки природного диатомита 2 М раствором  $\text{HCl}$  и модифицированного диатомита методами ионной хроматографии и атомно-абсорбционной спектроскопии ( $n=3$ ;  $t_{p,f}=4,3$ ;  $p=0,95$ )

№ п/п	$\omega$ (%) $\pm \frac{t_{p,f} \cdot S}{\sqrt{n}}$				
	CaO	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$
Первичная обработка	$0,123 \pm 0,011$	$0,103 \pm 0,007$	$6,59 \pm 0,11$	$0,080 \pm 0,002$	$0,049 \pm 0,003$
Повторная обработка	$0,025 \pm 0,003$	$0,038 \pm 0,005$	$3,04 \pm 0,04$	$0,031 \pm 0,002$	$0,021 \pm 0,003$
Диатомит модифиц.	$0,175 \pm 0,006$	$0,085 \pm 0,003$	$4,30 \pm 0,03$	$0,075 \pm 0,004$	$0,170 \pm 0,002$

Данные табл. 5, 6 свидетельствуют о том, что после первичной обработки природного диатомита 2 М  $\text{HCl}$  вымываются из породы в большей мере ионы и, соответственно, оксиды  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ . Перечисленные элементы остаются в породе в количествах, которые можно отнести к примесям.

Результаты экспериментального анализа природного и модифицированного диатомита методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (EDS) представлены в табл. 8, 9.

Т а б л и ц а 8

Элементный состав природного/модифицированного диатомита по данным энергодисперсионного рентгеновского микроанализа

Element	$W_b$ , %	$At$ , %
1	2	3
C	01,55 / 01,47	02,59 / 02,42
O	51,62 / 52,70	64,79 / 65,36
Na	00,11 / 00,14	00,10 / 00,12
Mg	00,42 / 00,19	00,35 / 00,16
Al	02,43 / 01,62	01,81 / 01,19
Si	40,55 / 42,98	28,99 / 30,36
K	00,65 / 00,37	00,33 / 00,19



1	2	3
Ca	00,53 / -	00,27 / -
Ti	00,15 / 00,21	00,06 / 00,09
Fe	01,99 / 00,31	00,72 / 00,11

Т а б л и ц а 9

Элементный состав природного и модифицированного диатомита по данным энергодисперсионного рентгеновского микроанализа ( $n=3$ ;  $t_{p,f}=4,3$ ;  $p=0,95$ )

Объект	Определяемый параметр: $\omega$ (%) $\pm \frac{t_{p,f} \cdot S}{\sqrt{n}}$							
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Природный диатомит	80,0 ± 0,04	1,33 ± 0,03	1,47 ± 0,01	2,84 ± 0,02	4,59 ± 0,03	0,37 ± 0,02	0,15 ± 0,03	2,18 ± 0,01
Модифицированный диатомит	92,1 ± 0,02	-	0,32 ± 0,03	0,44 ± 0,02	3,06 ± 0,04	0,35 ± 0,01	0,19 ± 0,03	0,44 ± 0,02

По результатам анализа можно сделать вывод о том, что модифицированный диатомит на 92 % состоит из кремнезема и лишь примерно 8 % – примеси. Природный диатомит содержит примерно 80 % SiO<sub>2</sub>, остальное – примеси. Следовательно, обработка природного диатомита 2 М соляной кислотой позволяет удалить полностью карбонаты кальция и большую часть магния. Снижается содержание железа(III), удаляется глинистая составляющая. Очень важным моментом является уменьшение содержания магния, так как его соединения способствуют образованию высолов на бетоне и изделий из него. Глинистая составляющая снижает адгезию материала.

Размер частиц модифицированного диатомита, установленный с помощью Nikon LV-150, представлен на рис. 1. Показано, что модифицированный диатомит имеет размер частиц 5-10 мкм и представляет собой тонкодисперсный порошок.

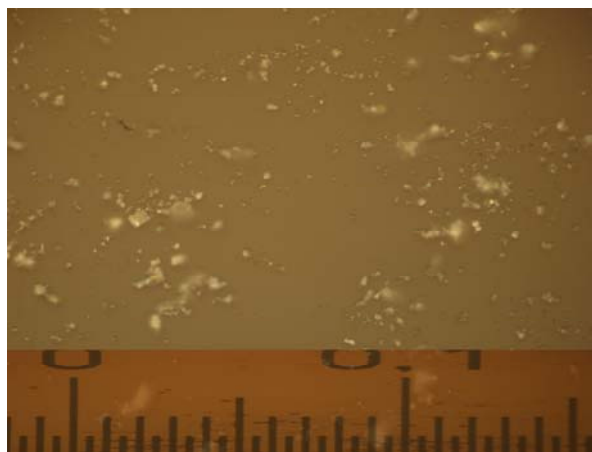


Рис. 1. Фотография частиц модифицированного диатомита, сделанная на оптическом микроскопе Nikon LV-150 при увеличении x1000

На рис. 2 представлена структура порошка модифицированного диатомита при увеличении в 3000 раз. На рисунке видно, что диатомит – это легкая тонкопористая порода, сложенная мельчайшими створками (или обломками) диатомитовых водорослей – диатомей. Каждая створка диатомей в составе диатомитов обладает четко упорядоченной структурой, что обеспечивает низкую плотность диатомита, его высокие теплоизолирующие характеристики, благодаря которым он применяется для теплоизоляции поверхностей, как наполнитель, сорбент, фильтрующий материал, носитель катализаторов.

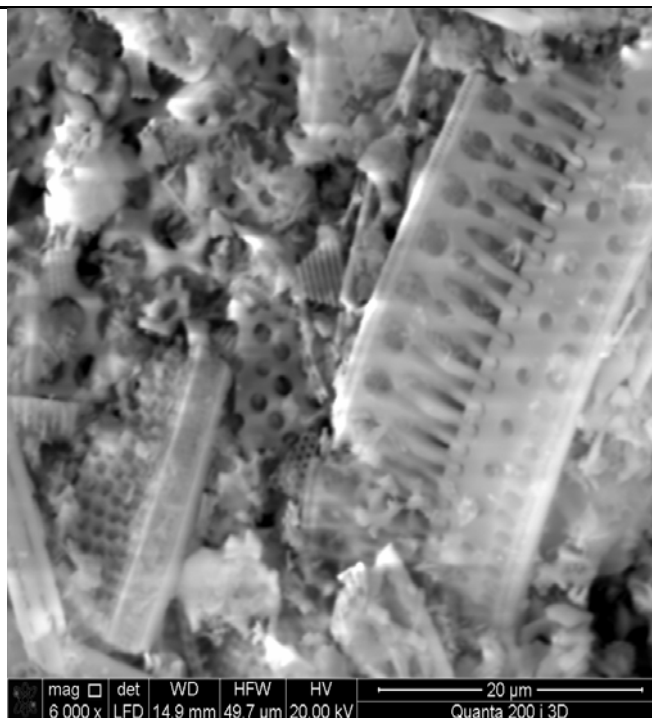


Рис. 2. Структура порошка модифицированного диатомита, полученная с использованием многофункционального растрового электронного микроскопа с интегрированной системой фокусированного ионного пучка Quanta 200i 3D FEI при увеличении в 6000 раз

Изучены ИК-спектры поглощения мелкодисперсных кремнезёмов природного Атемарского диатомита, модифицированного 2 М раствором HCl, и стандартного образца  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (рис. 3).

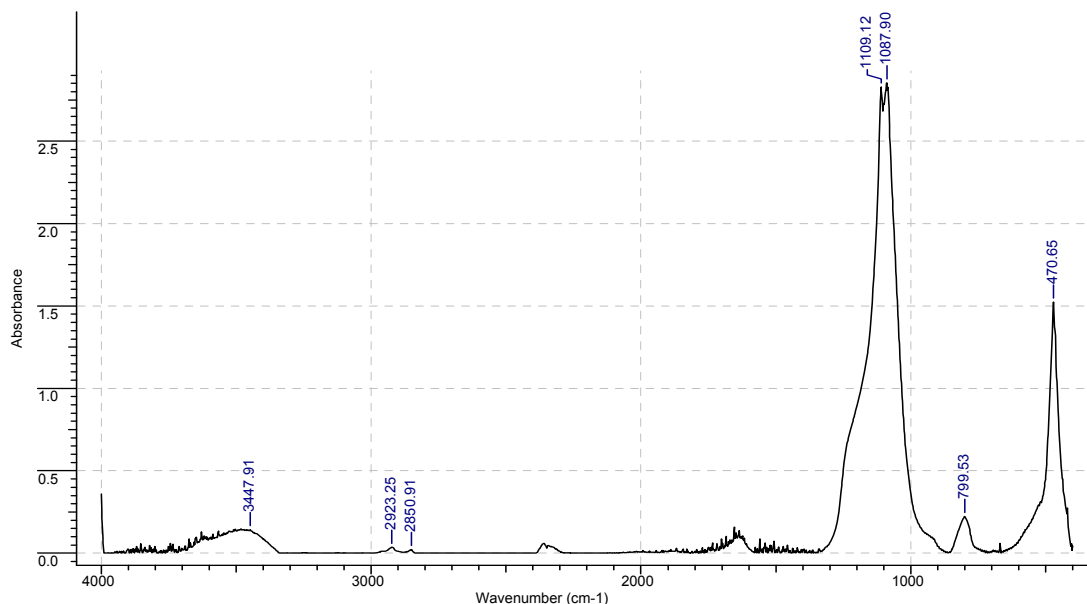


Рис. 3. Кривая спектрального анализа модифицированного природного диатомита

В ИК-спектрах всех образцов присутствует широкая полоса поглощения в области волновых чисел  $3500\text{--}3300\text{ см}^{-1}$  и более узкая полоса в пределах  $1630\text{--}1640\text{ см}^{-1}$ . В спектрах природного и модифицированного диатомита четко прослеживаются полосы поглощения, соответствующие адсорбционной воде,  $3432$  и  $3447\text{ см}^{-1}$ . Полоса поглощения  $1631\text{ см}^{-1}$  соответствует молекулам воды, имеющим водородные связи с силанольными группами.

Полосы поглощения 1103, 1087 и 1105  $\text{см}^{-1}$  соответствуют валентным колебаниям связи  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ . Полосы поглощения 798, 466, 799, 470  $\text{см}^{-1}$  являются индивидуальной характеристикой соединений.

Рентгенограмма порошка модифицированного диатомита, сделанная на приборе ДРОН-6 свидетельствует о том, что широкий дифракционный максимум указывает на присутствие аморфной фазы. Кристаллическая фаза если и присутствует, то ее содержание менее 5 %. Рентгенограмма стандартного силикагеля и рентгенограмма полученного диатомита идентичны.

Изучены изменения массы модифицированного диатомита при изменении температуры термогравиметрическим методом. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

На термоаналитических кривых во всем интервале нагрева наблюдается потеря массы диатомита. Как видно из экспериментальных данных, процесс потери массы происходит в 3 этапа. На первом этапе (интервал температур 25-200  $^{\circ}\text{C}$ ) образец теряет 2,2 % своей массы. Видимо, происходит интенсивное удаление адсорбированной воды, содержащейся в образце в силу особенностей синтеза. Пик кривой ДТГ приходится на 68  $^{\circ}\text{C}$ . На втором этапе при 210-400  $^{\circ}\text{C}$  образец теряет 1,05 % своей массы, вероятно, за счет удаления поровой воды, которая содержится в диатомите в силу структурных особенностей его строения. Третий этап характеризуется потерей массы при температуре выше 410  $^{\circ}\text{C}$ , при этом потеря массы составляет 1,8 %. Можно предположить, что здесь происходит выгорание органических веществ, выделяющихся в виде  $\text{CO}_2$ , придающего образцу темно-бурую окраску. Таким образом, при нагревании модифицированного диатомита от 25 до 900  $^{\circ}\text{C}$  в общей сложности теряется 5,1 % массы образца при скорости нагрева 10  $^{\circ}\text{C}$  в минуту.

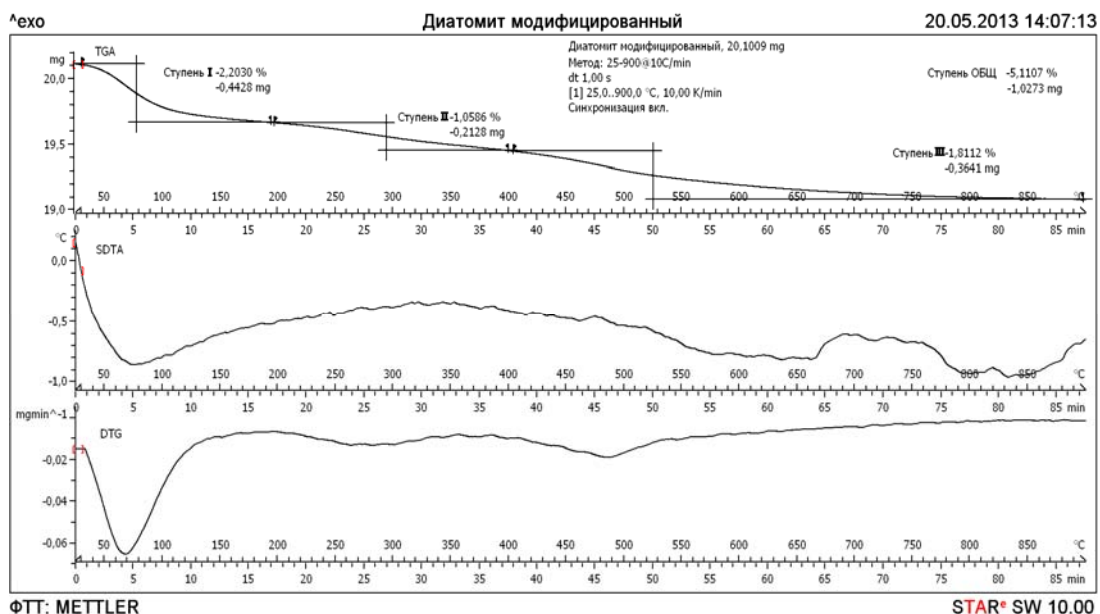


Рис. 4. Кривая термогравиметрического анализа модифицированного природного диатомита

Нанопорошки имеют низкую теплопроводность и могут быть использованы в качестве теплоизоляторов и теплоизолирующих прокладок; поэтому нами была изучена теплопроводность модифицированного диатомита. Диатомит без предварительного прокаливания имеет теплопроводность  $\lambda = 0,177$  Вт/(м·К) при кажущейся плотности  $\rho = 260$  кг/м<sup>3</sup>. После прокаливания при 200 и 500  $^{\circ}\text{C}$  в муфельной печи в течение 1 часа теплопроводность составила соответственно 0,173 и 0,168 Вт/(м·К) при кажущейся плотности  $\rho = 250$  кг/м<sup>3</sup>. После обработки СВЧ-излучением в течение 5 минут прокаленного порошка при 200 и 500  $^{\circ}\text{C}$  –  $\lambda = 0,168$  и 0,163 Вт/(м·К). Таким образом, при взаимодействии СВЧ-излучения происходят удаление адсорбированной воды, увели-

чение пористости модифицированного диатомита, что ведет к уменьшению теплопроводности дисперсной системы.

Полученный таким образом мелкодисперсный кремнезем можно использовать как добавку к цементам, так как он представляет собой очень мелкие шарообразные частички аморфного кремнезема со средней удельной поверхностью около 20 кв. м/г. Модифицированный диатомит используется для получения особого вида силиконовой резины, в качестве адсорбента, как составная часть строительных сухих смесей, в лакокрасочной промышленности, является постоянным компонентом для многих продуктов, для некоторых видов шинной резины, применяемой для производства высококачественных покрышек.

#### Список литературы

1. Микроструктура перспективных теплоизоляционных материалов на основе диатомитов Среднего Поволжья / В.П. Селяев, В.А. Неверов, Л.И. Куприяшкина, А.В. Колотушкин, В.В. Сидоров // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №1 (15). – С. 12–17.
2. Теплоизоляционные свойства материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков / В.П. Селяев [и др.] // Строительные материалы. – 2013. – №1. – С. 61–64.
3. Diatomite middle Volga. Structure and properties / V.P. Selyaev [etc.] // Science and Education. April 25-26, 2013. Vol. I. Munich, Germany.

#### References

1. Microstructure promising thermal insulation materials based on diatomite Middle Volga / V.P. Selyaev, V.A. Neverov, L.I. Kupriyashkina, A.V. Kolotushkin, V.V. Sidorov // Regional architecture and engineering. – 2013. – № 1 (15). – P. 12–17.
2. Insulating properties of materials on the basis of fine mineral powders / V.P. Selyaev [etc.] // Building materials. – 2013. – № 1. – P. 61–64.
3. Diatomite middle Volga. Structure and properties / V.P. Selyaev [etc.] // Science and Education. April 25-26, 2013. Vol. I. Munich, Germany.

Инженерно-строительный институт  
Сибирского федерального университета  
Россия, 660041, г. Красноярск,  
пр. Свободный, 82,  
тел.: +7 (391) 252-78-11;  
факс: +7 (391) 244-58-60

**Назирова Рашит Анварович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Проектирование зданий  
и экспертиза недвижимости»  
E-mail: nazirovra@gmail.com

**Волков Александр Николаевич,**  
аспирант кафедры «Строительные  
материалы и технологии строительства»  
E-mail: volkov-sasha@yandex.ru

*Civil Engineering Institute of the Siberian  
Federal University*

Russia, 660041, Krasnoyarsk, 82,  
Svobodny Prospect,  
tel.: +7 (391) 252-78-11;  
fax: +7 (391) 244-58-60

**Nazirov Rashit Anvarovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Design of buildings and real  
estate expertise»  
E-mail: nazirovra@gmail.com

**Volkov Alexander Nikolaevich,**  
Postgraduate of the department «Building  
materials and construction technology»  
E-mail: volkov-sasha@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛОЕМКИХ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

Р.А. Назиров, А.Н. Волков

Приведены результаты расчетов работы бетонов с теплоемким заполнителем в виде инкапсулированной воды в условиях нестационарных наружных температур. Показано влияние теплоемкого заполнителя с различным объемным содержанием на температуру поверхности бетонов с матрицей из тяжелого и легкого бетонов. Проведена сравнительная оценка результатов натурного эксперимента и теоретического расчета на основе метода конечных элементов.

*Ключевые слова: теплоемкий бетон, нестационарное температурное поле, натурный эксперимент, теоретический расчет.*

## THE RESEARCH OF THERMAL HEAT STORAGE CONCRETES BEHAVIORAL PATTERNS IN THE CONDITIONS OF TRANSIENT OUTSIDE AIR TEMPERATURE

R.A. Nazirov, A.N. Volkov

The calculation results of cement concrete behavioral patterns with thermal heat storage aggregate in the form of the encapsulated water in the conditions of transient outside air temperatures are given. The influence of thermal heat storage aggregate with various volume contents on a concrete surface temperature with a matrix of heavy and lightweight concretes is shown. The comparative assessment of full-scale experiment results and theoretical calculation on the basis of the final elements method is presented.

*Keywords: thermal heat storage concrete, transient temperature field, full-scale experiment, theoretical calculation.*

В соответствии с действующим законодательством РФ по вопросам энергосбережения и повышения энергоэффективности строительных объектов, особо актуальной является задача разработки составов бетонов с различными теплофизическими свойствами. Существенного изменения теплоемкости цементных бетонов, например, можно достичь применением теплоемкого заполнителя. Использование главного принципа работы теплоемких материалов позволит уменьшить амплитуду колебания температур и увеличить время (сдвиг по фазе) при нагреве и охлаждении на поверх-

ности и в объеме материала. Таким образом, появляется возможность регулировать требуемый комфортный микроклимат в помещениях при сокращении энергопотребления здания в целом [1]. В качестве примера в статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований работы бетонов с теплоемким наполнителем в виде инкапсулированной воды с различным объемным содержанием.

Большинство строительных объектов эксплуатируется в условиях периодически изменяющихся температур. При решении технических задач обычно принимается, что этот процесс продолжается достаточно долго и, таким образом, начальное распределение температуры в конструкции уже не оказывает влияния на установившуюся теплопередачу через ограждение. Аналитические решения подобных задач для различных тел подробно изложены в известных публикациях [2,3]. В этих задачах изменение температуры внешней среды  $T_{ext}$  принимается по закону простого гармонического колебания и задается в виде функции:

$$T_{ext}(\tau) = T_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \tau) + T_0, \quad (1)$$

где  $T_m$  – амплитуда колебания температуры внешней среды;  $\nu = \frac{1}{P}$  – частота колебания ( $P$  – период изменения температуры);  $\tau$  – время;  $T_0$  – начальная температура. Если имеет место конвективный теплообмен с окружающей средой, задача решается с начальными и граничными условиями:

$$T(x, 0) = T_0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial T(L, \tau)}{\partial x} + a [T_0 + T_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \tau) - T(L, \tau)] = 0, \quad (4)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Не останавливаясь подробно на ходе решения, которое изложено в [2], приведем окончательное решение задачи для определения относительной температуры на поверхности для полуограниченного тела в обобщенных переменных:

$$\theta = A_0 \cdot \exp\left(-\left(0,5 \cdot Pd_x\right)^{0,5}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot \tau - \left(0,5 \cdot Pd_x\right)^{0,5} - M\right), \quad (5)$$

где  $Pd_x = \frac{\omega \cdot X^2}{a}$  – локальное число Предводителя для координаты  $X$ ;  $\omega = 2\pi\nu$  – круговая частота.

$$A_0 = \sqrt{\left[1 + \frac{\sqrt{2}}{Bi^*} + \left(\frac{1}{Bi^*}\right)^2\right]}, \quad (6)$$

$$M = \arctg\left(\frac{1}{1 + \sqrt{2} Bi^*}\right), \quad (7)$$

где  $A_0$  и  $M$  – соответственно амплитуда колебания и величина смещения по фазе температуры на поверхности по сравнению с колебаниями температуры среды  $T_{ext}$ ,  $Bi^*$  – обобщенный аргумент,

$$Bi^* = \frac{a}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \omega}}; \quad (8)$$

здесь  $a$  – коэффициент теплоотдачи.

Величины коэффициентов  $A_0$  и  $M$  представляют интерес с точки зрения обеспечения комфорта в помещении и энергоэффективности, в частности обеспечения

нормирования перепада температур между внутренним воздухом и температурой поверхности стеновых ограждений, которая в соответствии с [4] не должна превышать 4 °С. Величина коэффициента  $M$  актуальна при оценке в том числе материалов с переменным фазовым состоянием (ПФС). Сдвиг по фазе косинусоид при применении материалов с ПФС позволяет нивелировать экстремальные значения температур, накапливать тепловую энергию (в частности в конструкциях полов и стен) и тем самым экономить электрическую и тепловую энергию [5].

При оценке параметров  $A_0$  и  $M$  на поверхности материала, при  $X=0$ , формула (5) приобретает более простой вид:

$$\theta = A_0 \cdot \cos(\omega \cdot \tau - M). \quad (9)$$

Таким образом, относительная температура на поверхности зависит от параметров  $A_0$  и  $M$ , величины которых определяются значением параметра  $Bi^*$  [2].

В результате теоретических расчетов по приведенным выше аналитическим формулам получены графики изменения относительной температуры, величины  $M$  и критерия  $Bi^*$  в зависимости от объемного содержания теплоемкого заполнителя для матрицы из тяжелого плотностью 2400 кг/м<sup>3</sup> и легкого плотностью 600 кг/м<sup>3</sup> бетонов при коэффициенте теплоотдачи внутренней поверхности, согласно [4],  $\alpha_{int}=8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) за период  $P=24$  часа (рис.1). Хорошо видно, что для матрицы из тяжелого бетона незначительное изменение  $A_0$  и  $M$  происходит при содержании теплоемкого заполнителя более 50 % по объему. Для матрицы из легкого бетона критерий  $Bi^*$  уменьшается с увеличением объемной доли заполнителя, как показано на рис. 5. Эффект изменения критерия  $Bi^*$  заметен в большей мере. Однако в отличие от матрицы из тяжелого бетона величина  $A_0$ , наоборот, уменьшается, а  $M$  увеличивается.

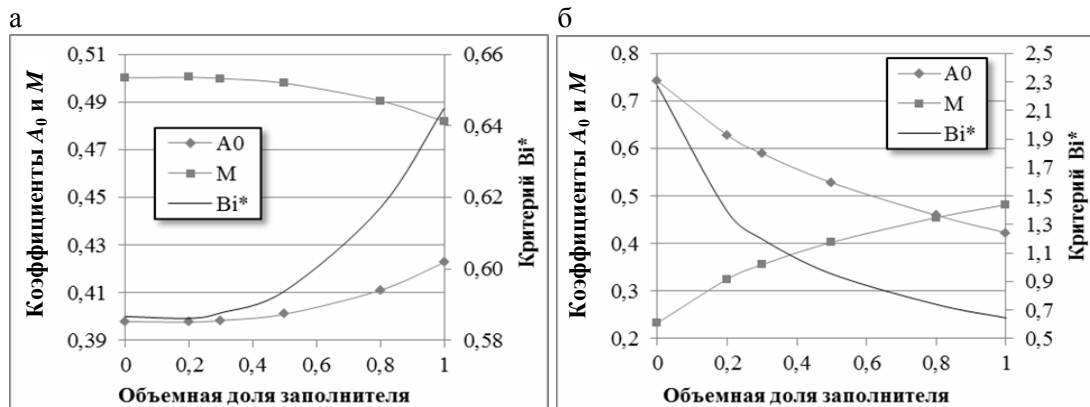


Рис.1. Изменение коэффициентов  $Bi^*$ ,  $A_0$  и  $M$  в зависимости от объемного содержания теплоемкого заполнителя, наполненного водой, для матрицы из тяжелого (а) и легкого (б) бетонов

На рис.2 представлены графики изменения температуры на поверхности различных бетонов с объемным содержанием теплоемкого заполнителя 80 % и бетонов обычного состава при коэффициенте теплоотдачи  $\alpha_{int}=8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Основные расчетные теплофизические характеристики исследуемых материалов представлены в таблице.

Характеристики исследуемых материалов

Материал	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
<i>Матрица из тяжелого бетона</i>			
Обычный бетон	840	2400	1,50
Теплоемкий бетон	2926	1278	0,73
<i>Матрица из легкого бетона</i>			
Обычный бетон	840	600	0,40
Теплоемкий бетон	3744	918	0,55



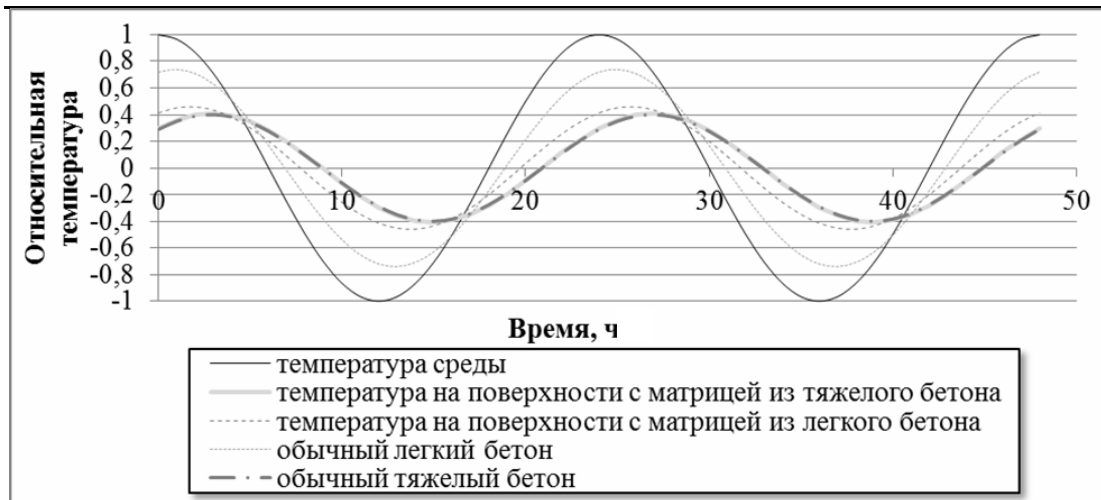


Рис.2. Изменение температуры на поверхности различных бетонов с объемным содержанием теплоемкого заполнителя 80 % и бетонов обычного состава

Хорошо видно (см. рис.2), что относительная температура на поверхности с матрицей из тяжелого теплоемкого бетона практически не изменилась по сравнению с температурой обычного тяжелого бетона. Для теплоемкого бетона с матрицей из легкого бетона по сравнению с обычным легким бетоном наблюдается иная картина: амплитуда относительной температуры уменьшилась с 0,7 до 0,4, а сдвиг по фазе составил 1 час.

Для сравнительной оценки работы обычного ( $\rho=1960 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda=0,53 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ,  $c = 840 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ ) и теплоемкого ( $\rho=1838 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda=0,49 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ,  $c = 1838 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ ) бетонов в реальных условиях был проведен специальный эксперимент, который заключался в циклическом нагреве и охлаждении экспериментальных образцов, помещенных на застекленную лоджию в натуральных условиях. В качестве образцов использовались пластины ( $0,25\text{м}\times 0,25\text{м}\times 0,05\text{м}$ ) из мелкозернистого бетона без заполнителя и с 27 % объемным содержанием теплоемкого заполнителя сферической формы в виде инкапсулированной воды диаметром 0,04 м. Снизу и по контуру образцы были изолированы пенополистиролом. На поверхности образцов устанавливались термопары, которые фиксировали температуру с интервалом в 5 минут в течение 15 дней. В результате эксперимента получены графики изменения температуры на поверхности исследуемых образцов и окружающей среды за период с 09.07.2013 г. по 24.07.2013 г. в г. Красноярске.

Влияние изменения состава бетона на температуру поверхности хорошо видно на рис.3. Минимальная температура на поверхности образцов практически не изменилась и составила:  $21,2 \text{ °C}$  – для бетона из теплоемкого состава,  $21,4 \text{ °C}$  – для обычного состава. Существенно изменилась амплитуда температур. Видно, что максимальное значение температуры на поверхности теплоемкого бетона понизилось почти на  $5 \text{ °C}$  по сравнению с максимальной температурой для обычного бетона, при этом размах между экстремальными значениями температур уменьшился почти на 20 %. Хорошо видно запаздывание экстремальных температур. Сдвиг по времени максимальных значений температур на поверхности образцов относительно окружающей среды характерен как для бетона обычного состава, так и для теплоемкого бетона. Для обычного бетона он составил примерно 35 минут, а для теплоемкого – 80 минут.

С использованием программного комплекса Ansys произведен теоретический расчет. На поверхности бетона задавались граничные условия третьего рода: температурная история окружающей среды и коэффициент теплоотдачи, который оказался равным для обычного бетона  $22 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ , а для теплоемкого  $20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ . Геометрическая модель и основные характеристики образцов, такие, как плотность, теплопроводность и начальная температура, равная  $20 \text{ °C}$ , приняты по результатам непосредственных измерений. Теплоемкость тяжелого бетона принята  $840 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$

по справочным данным [4], а теплоемкого бетона 1838 Дж/(кг·°C) рассчитана по формуле

$$C = c_m \cdot \frac{\rho_m}{\rho} \cdot \varphi_m + c_L \cdot \frac{\rho_L}{\rho} \cdot (1 - \varphi_m), \quad (10)$$

где  $c_m$  и  $\rho_m$  – соответственно, теплоемкость и плотность затвердевшей растворной части бетона, в которой распределен заполнитель;  $c_L$  и  $\rho_L$  – соответственно, теплоемкость и плотность теплоемкого заполнителя;  $\varphi_m$  – объемная доля растворной части в бетоне.

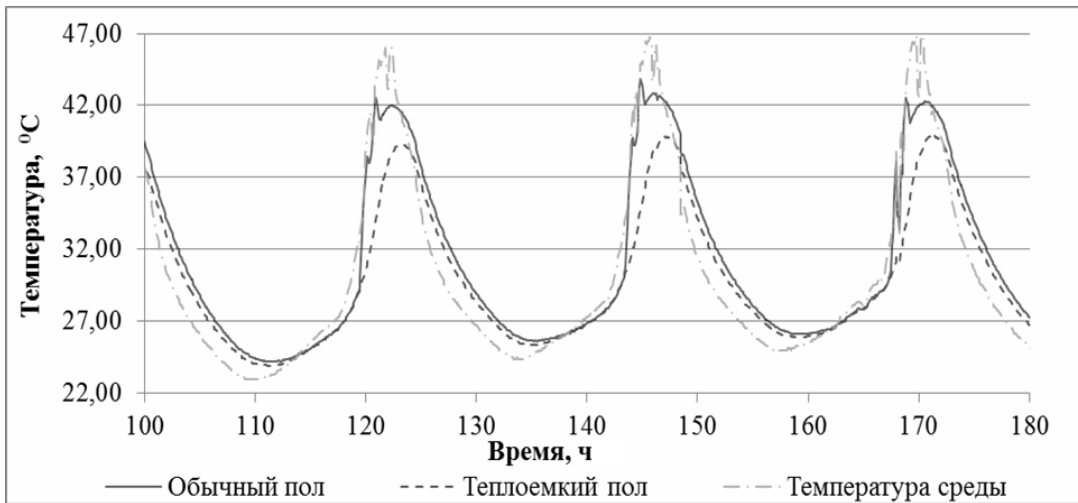


Рис.3. Изменение температуры на поверхности образцов из бетона теплоемкого и обычного состава в течение трех суток

На рис.4 представлены результаты непосредственных измерений и теоретического расчета температуры на поверхности образцов из обычного (а) и теплоемкого (б) бетонов. Оценка расчетных и экспериментальных результатов производилась путем сравнения основных статистических показателей значений температур за весь период наблюдений в квазистационарном состоянии работы материала образцов (50 часов от начала эксперимента). Отклонение данных теоретических расчетов от экспериментальных результатов для обычного бетона не превысило 5 %, а для теплоемкого – 2,5 %.

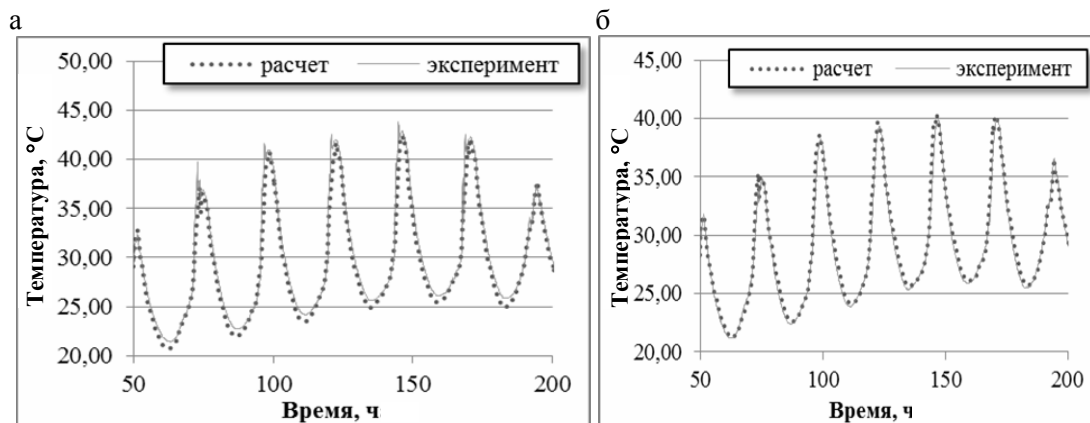


Рис.4. Сопоставление данных теоретических расчетов с экспериментальными результатами для обычного (а) и теплоемкого (б) бетонов

Таким образом, теоретическими расчетами и экспериментально показана возможность изменения теплофизических свойств цементных бетонов путем применения в качестве заполнителя теплоемких материалов.

Установлено влияние теплоемкого заполнителя с различным объемным содержанием на критерий  $Vi^*$ , амплитуду колебания и смещения по фазе температуры на поверхности бетонов с матрицей из тяжелого и легкого бетонов. Для матрицы из тяжелого бетона заметное влияние на изменение амплитуды, смещение максимальных температур и критерия  $Vi^*$  оказывает введение теплоемкого заполнителя лишь более 50 % по объему. Для матрицы из легкого бетона, в отличие от матрицы из тяжелого бетона, с увеличением объемной доли заполнителя в большей мере заметно изменение этих параметров во всем рассматриваемом диапазоне. Величина относительной температуры на поверхности уменьшается в 1,8 раза, критерий  $Vi^*$  – в 3,3 раза, а сдвиг по фазе увеличивается в 2,3 раза. При этом следует отметить, что амплитуда относительной температуры на поверхности бетона с матрицей из легкого бетона с 80 % объемным содержанием теплоемкого заполнителя, по сравнению с амплитудой температуры окружающей среды, соответствует требованиям СП 50.13330.2012 в части нормирования температурного перепада между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции.

При сравнительной оценке данных, полученных экспериментальным путем и в ходе теоретических расчетов, работы цементных бетонов теплоемкого и обычного составов в натуральных условиях наблюдалась хорошая сопоставимость результатов.

#### Список литературы

1. Rinaldi, N. Thermal Mass, Night Cooling and Hollow Core Ventilation System as Energy Saving Strategies in Buildings. Master Thesis. 2009. – P. 335.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
3. Александровский, С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций / С.В. Александровский. – М., 2004. – 332 с.
4. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook / Y. Zhang [etc.] // Building and Environment. – 2007. – Vol. 42. – P. 2197–2209.

#### References

1. Rinaldi, N. Thermal Mass, Night Cooling and Hollow Core Ventilation System as Energy Saving Strategies in Buildings. Master Thesis, 2009. – P. 335.
2. Lykov, A.V. The theory of heat conduction / A.V. Lykov. – M.: High School, 1967. – 600 p.
3. Alexandrovsky, S.V. Durability exterior walling / S.V. Alexandrovsky. – M., 2004. – 332 p.
4. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook / Y. Zhang [etc.] // Building and Environment. – 2007. – Vol. 42. – P. 2197–2209.

УДК 691.31

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

**Мороз Марина Николаевна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: mn\_moroz@mail.ru

**Калашников Владимир Иванович**,  
заслуженный деятель науки РФ, советник  
РААСН, заведующий кафедрой  
«Технологии строительных материалов  
и деревообработки»  
E-mail: techbeton@pguas.ru

**Суздальцев Олег Владимирович**,  
аспирант кафедры «Технологии  
строительных материалов  
и деревообработки»  
E-mail: spartak88ru@mail.ru

**Янин Валентин Семенович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Инженерная экология»

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

**Moroz Marina Nikolaevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Technologies of building  
materials and wood processing»  
E-mail: mn\_moroz@mail.ru

**Kalashnikov Vladimir Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Honoured worker of science of Russian  
Federation, Adviser of the Russian Academy  
of Architecture and Construction Sciences,  
Head of the department «Technologies of  
building materials and wood processing»  
E-mail: techbeton@pguas.ru

**Suzdaltsev Oleg Vladimirovich**,  
Postgraduate of the department «Technologies  
of building materials and wood processing»  
E-mail: spartak88ru@mail.ru

**Yanin Valentin Semenovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Engineering ecology»

## ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ДЕКОРАТИВНО-ОТДЕЛОЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТНО-ГИДРОФОБИЗИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ

М.Н. Мороз, В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, В.С. Янин

Приведены результаты исследований высокопрочных декоративно-отделочных бетонов с долговечной гидрофобной глянцевой поверхностью.

*Ключевые слова:* декоративно-отделочные материалы, поверхностная гидрофобизация, составы, высокопрочные реакционно-порошковые бетоны, дисперсные наполнители.

## HIGH-STRENGTH DECORATIVE AND FINISHING HYDROPHOBIC CONCRETE

M.N. Moroz, V.I. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev, V.S. Yanin

Research results of receiving high strength decorative and finishing concrete with a durable hydrophobic glossy surface are given.

*Keywords:* decorative and finishing materials, superficial hydrofobization, compositions of concrete, high-strength reactionary and powder concretes, disperse fillers.

Архитектурно-декоративные бетоны могут быть использованы при изготовлении отделочных фасадных плиток самой разнообразной цветовой гаммы и стеновых теплоэффективных панелей с несущим внутренним и декоративным наружным слоем. Этим возможности индивидуального дизайна изделий и конструкций из порошковых бетонов не ограничены. Можно создавать различные поверхности, начиная от модного глянца до шероховатых, пористых, с самыми «ажурными» поверхностями и с возможным достижением эффекта «старения».

Горные предприятия накопили в отвалах примерно 5 млрд м<sup>3</sup> отсеков горных пород, из которых, по разным оценкам, осваивается не более 9–12 % [1]. При дополнительном извлечении тонких фракций 0–5 мм из отсеков камнедробления базальтовых, гранитных, карбонатных пород они могут стать наиболее востребованным сырьем для получения каменной муки для производства реакционно-порошковых декоративно-отделочных бетонов. Каменная мука в бетонах с добавкой суперпластификатора является реологически-активной дисперсной фазой. Она, увеличивая объем агрегативно-устойчивой водно-дисперсной суспензии, улучшает растекаемость бетонных смесей. Это позволяет существенно снизить содержание воды в бетонных смесях, повысить плотность, прочность бетона и другие физико-механические свойства.

Бетоны для декоративно-отделочных плит должны быть высокопрочными ( $R_{сж} = 150–180$  МПа), очень плотными, с низким водопоглощением, не превышающим 0,5–1,0 % по массе. Это достигается использованием микротехнологии бетонов и добавлением в состав бетона большого количества микрометрических частиц молотого кварцевого песка, известняка, мрамора, гранита и тонкого кварцевого песка фракций 0,1–0,5 мм или 0,16–0,63 мм. Использование таких компонентов позволяет получить в бетоне, в совокупности с цементом и суперпластификатором, агрегативно-устойчивую предельно разрушенную высококонцентрированную суспензию, образующую самоуплотняющиеся бетонные смеси [2].

Повышение долговечности строительных материалов остается актуальной проблемой в строительном материаловедении.

В связи с этим цель исследований состояла в создании эффективных, высокопрочных, долговечных, экологичных современных декоративно-отделочных материалов с долговечной поверхностью с применением многотоннажных отходов камнедробления горных пород.

Разработаны составы архитектурно-отделочных плиток из тонкодисперсной самоуплотняющейся реакционно-порошковой бетонной смеси (РПБС) при содержании воды 10–11 % от массы сухих компонентов. В составе бетона в качестве вяжущего использовался белый Датский цемент СЕМ 52,5, в качестве каменной муки – тонкомолотый гранит. Удельная поверхность гранитной муки составляла 4400 см<sup>2</sup>/г. Содержание цемента было равно 730 кг/м<sup>3</sup>. В качестве очень мелкого песка использовалась отсепарированная фракция 0,16–0,63 мм из рядового песка Березовского карьероуправления. В качестве высокодисперсной пуццоланической добавки использовался Новокузнецкий гранулированный микрокремнезем в количестве 10 % от массы цемента. Разжижителем служил карбоксилатный гиперпластификатор Melflux 1641, добавляемый в количестве 0,9 % от массы цемента. Предел текучести бетонной смеси 9,4 Па, расплыв смеси из конуса Хегерммана – 250 мм. В зависимости от желаемой цветовой гаммы декоративно-отделочных бетонов в бетонную смесь добавляли различные пигменты. Реакционно-порошковые бетонные смеси оптимального состава заливали в подготовленные полимерные формы, достигая тем самым глянцевого покрытия архитектурно-отделочных бетонов.

Плотность реакционно-порошковых бетонов (РПБ) составляла 2260–2280 кг/м<sup>3</sup>. Прочность бетонов на сжатие 150–160 МПа, на растяжение при изгибе 15–17 МПа. Удельный расход цемента на единицу прочности – 4–5 кг/МПа. Длительными испытаниями (через 2 года) установлено повышение прочности на сжатие на 35 %; прочность на растяжение при изгибе увеличилась на 21 %. Усадочные деформации бетона через полгода не превышали 0,3 мм/м. Водопоглощение по массе реакционно-порошкового бетона через 3 суток очень низкое и составляло 0,6–0,80 %. В качестве примера в табл. 1 приведены свойства РПБ.

Плотная структура достигается путем создания оптимально подобранных дисперсных компонентов РПБ с использованием реологически-активной каменной муки. Низкое капиллярное водопоглощение никак не исключает диффузию атмосферных осадков в поры бетона. Влага, попадая в капиллярную систему бетона, начинает мигрировать по микропорам, впоследствии вынося солевые растворы и оставляя на поверхности высолы. Результаты такого негативного воздействия через полгода-год стано-

вятся видны невооруженным глазом. При этом ухудшается эстетическое восприятие декоративно-отделочных бетонов.

Т а б л и ц а 1

Состав и свойства реакционно-порошкового бетона

Состав и наименование характеристик	Значение характеристик
Расход цемента, кг	730
В/Ц	0,34
В/Т	0,11
Консистенция смеси, расплыв конуса Хегермана, см	25
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2260
$R_{сж}^{ну}$ , через 1 сут, МПа	75
$R_{сж}^{ну}$ , через 28 сут, МПа	156
Прирост прочности через 3 года от 28-суточной, %	35
$\sigma_R^{уд}$ , кг/МПа	4,7
Усадочные деформации, через 6 месяцев, мм/м	0,3
Водопоглощение по массе, через 3 суток, %	0,63

Поэтому в первую очередь следует создать надежную гидрофобную защиту декоративно-отделочных бетонов от непосредственного контакта с водной средой для сохранения цветовой гаммы и глянцевої поверхности, продления срока службы декоративных бетонов. Этого можно достичь эффективной поверхностной гидрофобизацией [3].

Для исследований по повышению водостойкости и сохранению глянцевої поверхности разработанных декоративных бетонов нами были взяты пропитывающие силиконовые гидрофобизаторы из серии «ПЕНТА» (г. Москва). Выбор производился по трем основным показателям: время высыхания пропитанного слоя, низкое водопоглощение бетона по массе и сохранение внешнего вида поверхности после пропитки (табл. 2). Пропитывающие жидкости наносились на поверхность бетона валиком в один слой.

Т а б л и ц а 2

Вид пропитывающего гидрофобизатора,  
поверхностное водопоглощение плиток и внешней поверхности

Марка гидрофобизатора	Внешний вид плиток после пропитки	Водопоглощение по массе, в % через:				Время высыхания гидрофобизатора, час/минуты
		1 час	2 сут	3 сут	25 сут	
«ПЕНТА-824»	глянцевая	0	0,054	0,08	0,096	1:15
«ПЕНТА-818»	«подтекший» молочный цвет	0,03	0,176	0,24	0,31	0:45
«ПЕНТА-820»	глянцевая	0,065	0,08	0,088	0,4	8:0
«ПЕНТА-894»	матовая	0,12	0,14	0,14	0,19	1:30
Контрольный состав (без пропитки)	–	0,09	0,39	0,63	1,3	–

Для определения водопоглощения лицевой поверхности плитки, пропитанной гидрофобными жидкостями, мы разработали специальную методику. Суть ее состоит в следующем: на боковых гранях образцов формировали бортики по периметру плиток. После взвешивания на лицевую поверхность наливали воду. Водопоглощение через лицевую поверхность плиток по массе, пропитанных гидрофобными жидкостями, определяли через 1 час, 2 суток, 3 суток, 25 суток.

Результаты гидрофобизирующих свойств пропитывающих жидкостей приведены в табл. 2. Из неё видно, что в образцах-плитках, пропитанных гидрофобизатором «ПЕНТА-824», водопоглощение по массе за 1 час практически нулевое. Время высыхания пропитанного слоя составляло от 45 минут до 8 часов, в зависимости от марки гидрофобизатора. Образцы, пропитанные гидрофобизатором «ПЕНТА-824», через 25 суток имеют самое низкое водопоглощение по массе – 0,096 %, что ниже такового значения контрольного состава в 13,5 раз.

При этом поверхность плиток после пропитки гидрофобизатором «ПЕНТА-824» и 24-суточного насыщения и высушивания остается глянцевой (рис. 1а).

При пропитке образцов составом «ПЕНТА-818» внешний вид поверхности плиток имеет подтекий, молочный цвет. При пропитке составом «ПЕНТА-894» поверхность плиток получается матовой. Использование гидрофобизатора «ПЕНТА-820» нецелесообразно в связи с длительным временем высыхания и высоким водопоглощением поверхностного слоя.

По результатам исследований для реакционно-порошковых бетонов можно рекомендовать пропитывающий гидрофобизатор «ПЕНТА-824». Он обеспечивает низкое водопоглощение по массе декоративно-отделочного бетона, быстрое высыхание поверхностного слоя и сохранение глянца на поверхности плиток.

Установлен механизм гидрофобизации гидрофобизированных декоративно-отделочных реакционно-порошковых бетонов. Он является поверхностно-проникающим с гидрофобизацией поверхности. Глубина пропитки составом «ПЕНТА-824» составляет 3 мм.

Декоративно-отделочные плиты могут быть получены несколькими способами: первый, осуществленный способ состоит в заливке цветной реакционно-порошковой смеси в полимерные формы и позволяет получать одноцветные или многоцветные глянцевые поверхности (см. рис. 1а). Второй способ заключается в нанесении на поверхность литой бетонной смеси цветной каменной крошки, укатывание крошки валиком и последующей шлифовке и полировке поверхности затвердевшего бетона (рис. 1б).

Зернистая каменная крошка может быть уложена на дно формы с последующей заливкой реакционно-порошковой бетонной смесью. Эта поверхность также подвергается шлифовке и полировке.

Преимуществом бетонов нового поколения является возможность проводить операцию шлифования через 1–2 суток после изготовления, так как бетон при нормальном твердении набирает прочность 70–90 МПа.

Разработки высокопрочного реакционно-порошкового бетона нового поколения нашли свое применение при изготовлении энергосберегающих трехслойных крупноформатных стеновых блоков с долговечным глянцевым покрытием (г. Красноярск, ООО «Эммануил»). Блоки представляют собой трехслойную железобетонную панель из бетона марок 1000–2000. Такие панели рекомендуются для строительства домов в условиях Крайнего Севера при температуре до минус 50 °С. Трехслойная стеновая панель легче обычной железобетонной, устойчивее к морозам. Новый реакционно-порошковый бетон быстро твердеет и набирает распалубочную прочность через 6–8 часов. Стеновая панель состоит из двух скорлуп толщиной по 3–5 сантиметров с дополнительными ребрами жесткости, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом.

Лицевой наружный и внутренний слои выполнены из высокопрочного реакционно-порошкового бетона. Внутри находится утеплитель – это или пенополистиролбетон, или минеральная вата плотностью 80–100 кг/м<sup>3</sup>. Каждая капсулированная гранула пенополистирола находится в тонкой и прочной реакционно-порошковой оболочке и выполняет теплосберегающую функцию. Квадратный метр такой панели весит всего 120–130 кг, в то время как квадратный метр традиционной стены толщиной 50 см из полнотелого кирпича весит не менее 800 кг. Это дает возможность значительно снизить материалоемкость изделий, сократить трудоемкость возведения зданий, сроки строительства и затраты на фундамент.



а



б

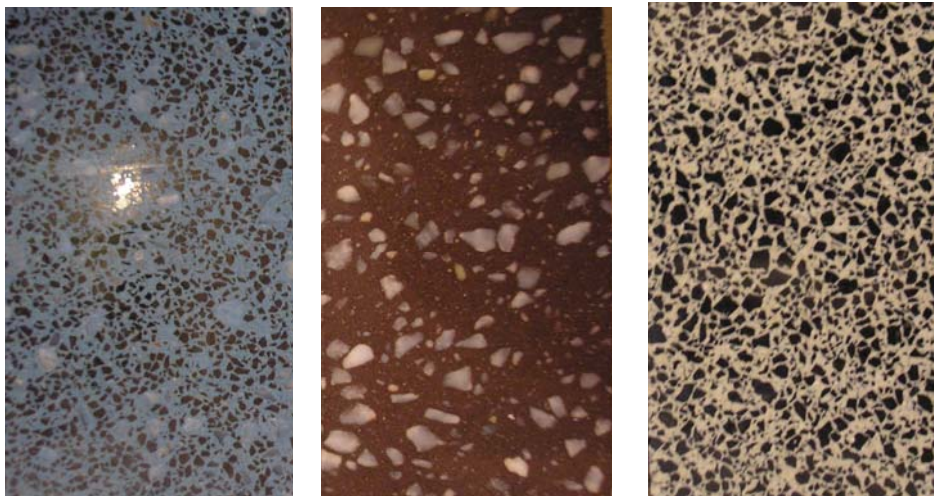


Рис. 1. Гидрофобизированные декоративно-отделочные поверхности:  
 а – плитки с разноцветной глянцевой поверхностью;  
 б – шлифованные плитки с включениями зернистых каменных материалов



Рис. 2. Фасадная часть стеновых крупноформатных блоков из цветного архитектурного высокопрочного реакционно-порошкового фибробетона с бесцветным прозрачным защитным покрытием

Подсчитаны технико-экономические показатели строительства с использованием блоков из реакционно-порошкового бетона: стоимость материала 1 кв. м стены, изготовленной по технологии ООО «Эммануил», на 35 % ниже 1 кв. м ж/б панели, изготовленной по проекту (2100 руб./м<sup>2</sup> и 3239 руб./м<sup>2</sup> соответственно).

На рис. 2 показана фасадная часть стеновых крупноформатных блоков. Она изготавливается из глянцевого цветного архитектурного высокопрочного реакционно-порошкового фибробетона с бесцветным прозрачным защитным покрытием.

Защитное покрытие, нанесенное на поверхность фасадной части блока, значительно повышает долговечность покрытия, защищает от атмосферных воздействий, предотвращает появление высолов и сохраняет глянцевую поверхность и насыщенный первоначальный цвет.

Испытание на морозостойкость гидрофобизированных декоративно-отделочных бетонов в независимой лаборатории показало: бетоны выдержали 900 циклов умеренного увлажнения-замораживания, после чего испытания были прекращены. Прочность на сжатие при этом не уменьшилась, а возросла на 10–15 %!

При «натурных» (природных) испытаниях образцов на стенде в течение года не было обнаружено видимых изменений поверхности, а цветовая гамма осталась такой же насыщенной, как до испытаний. Не наблюдалось потерь по массе и прочности, а также подтеков, высолов в течение периода испытаний. Это является хорошим доказательством возможности использования высокопрочного гидрофобного декоративно-отделочного бетона в климатических условиях России, в том числе суровых.

В заключение можно сделать вывод о разработке эффективных долговечных декоративно-отделочных гидрофобизированных реакционно-порошковых бетонов нового поколения с высокими физико-техническими и гигрометрическими показателями.

#### Список литературы

1. Буткевич, Г.Р. Промышленность неметаллических строительных материалов: достигнутое и перспективы / Г.Р. Буткевич // Строительные материалы. – 2003. – № 11. – С. 2–5.
2. Калашников, В.И. Основные принципы создания высокопрочных и особопрочных бетонов / В.И. Калашников // Популярное бетоноведение. – 2008. – №3. – С.102–107.
3. Калашников, В.И. Теоретические основы смачиваемости мозаичных гидрофобно-гидрофильных поверхностей / В.И. Калашников, М.Н. Мороз // Строительные материалы. – 2008. – №1 – С. 47–49.

#### References

1. Butkevich, G.R. Industry of nonmetallic construction materials: reached and prospects / G.R. Butkevich // Construction materials. – 2003. – № 11. – P. 2–5.
2. Kalashnikov, V.I. Basic principles of creation strength and high-strength of concrete / V.I. Kalashnikov // Popular betonovedeniye. – 2008. – № 3. – P. 102–107.
3. Kalashnikov, V.I. Theoretical bases of wettability of mosaic hydrophobic and hydrophilic surfaces / V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz // Construction materials. – 2008. – № 1. – P. 47–49.

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

**Белякова Елена Александровна**,  
старший преподаватель кафедры «Кадастр  
недвижимости и право»  
E-mail: var\_lena@mail.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

**Москвин Роман Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Эксплуатация автомобильного  
транспорта»

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

**Belyakova Elena Aleksandrovna**,  
Senior lecture of the department «Real estate  
cadastre and right»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

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

**Moskvin Poman Nikolaevich**,  
Candidate of Science, Associate Professor  
of the department «Operation of automobile  
transport»

## ВЫСОКОЭКОНОМИЧНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ ЦЕМЕНТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОЛЫ-УНОСА

В.И. Калашников, Е.А. Белякова, О.В. Тараканов, Р.Н. Москвин

Предложенный механохимический метод активизации золы-уноса позволяет расширить область ее применения в качестве основного компонента вяжущего низкой водопотребности и композиционного цемента марки ЦЕМ V. При этом разработанное цементно-зольное вяжущее (ЦЗВ) полностью соответствует нормативным требованиям. Использование такого вяжущего, в том числе при изготовлении бетонов нового поколения с низким удельным расходом вяжущего на единицу прочности, позволяет получить бетоны с высокими эксплуатационными свойствами.

*Ключевые слова:* малоцементные бетоны, зола-унос, суспензионные составляющие, гидравлическая активность, сроки схватывания, прочность.

## HIGHLY ECONOMICAL COMPOSITE CEMENT USING FLY ASH

V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, O.V. Tarakanov, R.N. Moskvin

Proposed mechano-chemical method of fly ash activation allows to extend the range of applications as the main component of low water binder and composition of cement CEM V. At the same time the developed cement-ash binder is fully consistent with regulatory requirements. Using such binders, including manufacture of new generation of concretes with low specific consumption per unit bonding strength allows to obtain high quality concrete properties.

*Keywords:* low cement concrete, fly ash, suspension components, hydraulic activity, setting time, strength.

На современном этапе развития промышленности большое количество всевозможных отходов с успехом утилизируются при производстве различных строительных материалов. За рубежом наиболее полно используются многотоннажные отходы

металлургической и энергетической промышленностей, такие, как золы и шлаки. Однако в России золы, в отличие от металлургических шлаков, используются всего на 10–15 % от их выхода. При этом применяются только те золы, которые удовлетворяют ГОСТ 25818–91 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия» по содержанию несгоревших остатков и веществ, содержащих  $\text{SO}_3$ , способствующих коррозии арматуры. Содержание свободных пережженных оксидов кальция и магния ( $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ), вызывающих саморазрушение бетона, также ограничивается.

В настоящее время в РФ большинство ТЭЦ работают на угле. Одним из наиболее эффективных путей решения проблемы утилизации их отходов является использование золы как наполнителя в строительных материалах и изделиях. По этому пути идут индустриально развитые страны мира.

Зола-унос представляет собой сухой тонкодисперсный материал, состоящий, как правило, из частичек размером до 0,14 мм, т.е. достаточно близким к дисперсности портландцемента. Она образуется в результате сжигания твердого топлива на ТЭЦ и улавливается циклонами и электрофильтрами. Частицы кислой золы представляют собой сферические зерна (размером 50–60 мкм), содержащие внутри себя еще более мелкие частицы размером 1–10 мкм (рис. 1). Поэтому если гранула не разрушена, то взаимодействие ее с водой начинается с поверхности стекловидной гранулы. Мелкие гранулы остаются нетронутыми до тех пор, пока не прогидратируется верхняя оболочка. Только после этого начнется гидратация более тонких гранул. Поэтому при использовании зол в естественном, т.е. немолотом виде разрушения крупных гранул практически не происходит.

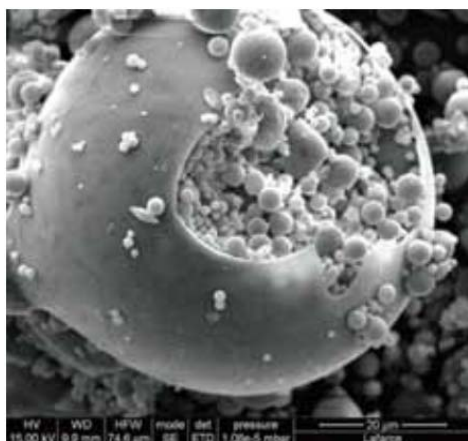


Рис. 1. Микрофотография кислой золы-уноса ТЭЦ [1]

В соответствии с Европейским стандартом EN-206-1 «Бетон. Общие технические требования. Производство и контроль качества» допускается замена цемента марки СЕМ I золой-уносом не более чем на 33 %. ГОСТ 31108–2003 «Цементы общестроительные. Технические условия» разрешает использовать при производстве цемента марки ЦЕМ II/A-3 от 6 до 20 % золы-уноса от массы вяжущего, а в композиционном цементе марки ЦЕМ V – от 11 до 30 % шлаков и от 11 до 30 % золы-уноса и пуццоланов.

Был разработан и исследован новый композиционный цемент, в котором использовалась только зола-унос в количестве до 60–70 %. Такое высокое содержание золы достигнуто совместным домолом портландцемента, золы и гипсового камня. Благодаря механохимической

активации цементно-золяного композита реализуются вяжущие свойства золы, ее интенсивное твердение происходит совместно с твердением портландцемента.

Вяжущие вещества, в том числе содержащие золу, должны обеспечивать равномерность изменения объема при испытании образцов кипячением в воде. Использование вяжущих с неравномерным изменением объема приводит не только к снижению прочности бетонов при их твердении, но даже к их разрушению при эксплуатации. Неравномерность изменения объема цементов вызвана замедленной гидратацией зерен  $\text{CaO}_{\text{своб}}$  и  $\text{MgO}_{\text{своб}}$  в затвердевшем теле бетона с увеличением объема. Поэтому было исследовано зольное и цементно-зольное вяжущее согласно ГОСТ 310.3–76 «Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема». Для этого из исходной и тонкомолотой золы изготавливались лепешки и через сутки твердения в нормальных условиях кипятились в воде в течение 4 часов. Оценивался внешний вид лепешек на наличие трещин и искривлений после кипячения. В результате испытаний установлено, что лепешки из исходной немолотой золы с удельной поверхностью  $S_{\text{уд}}=2200 \text{ см}^2/\text{г}$  не выдержали испытания на равномерность изменения объема. На лепешках появились трещины, и они саморазрушились (рис. 2а). Лепешки, изготовленные на тонкомолотой золе с  $S_{\text{уд}}=5500 \text{ см}^2/\text{г}$ , выдержали испытания на равномерность изменения объема (рис. 2б), как и все образцы из композиционного цементно-золяного вяжущего.



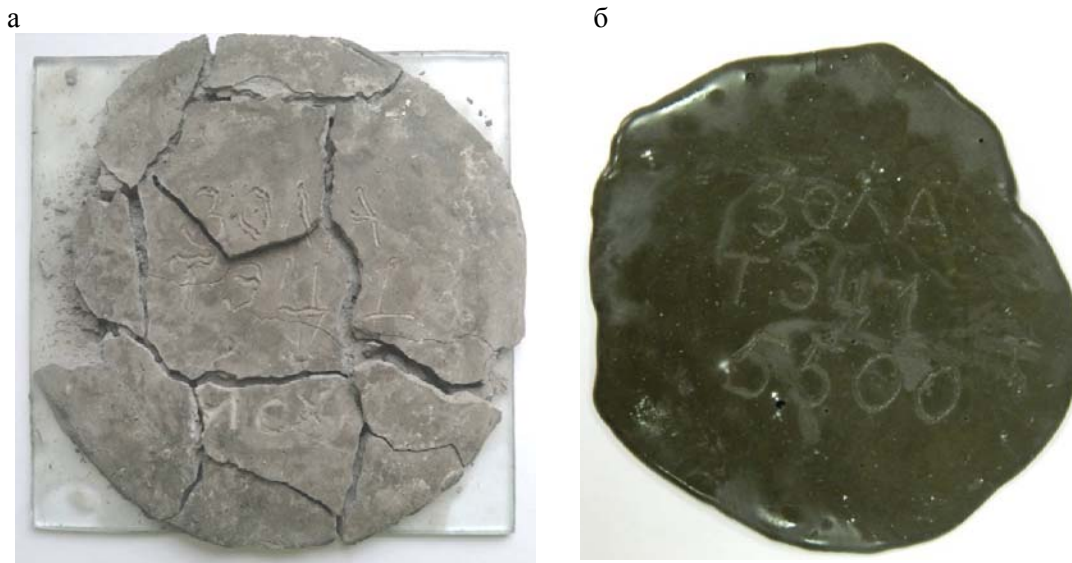


Рис. 2. Лепешки из исходной золы, не выдержавшие (а), и тонкомолотой, выдержавшие (б) испытания на равномерность изменения объема по ГОСТ

Для повышения гидравлической активности был использован механический способ домола и активации золы-уноса от сжигания углей Канско-Ачинского угольного бассейна, запасы которых составляют 40 % от общероссийского [2]. В результате механической активации обнажаются закапсулированные в стеклогранулах пережженные зерна  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ . Они доизмельчаются, и процесс гашения активных  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  происходит очень быстро с достаточно сильным тепловыделением и подъемом температуры до 33–43 °С. В гидратирующемся цементном тесте температура поднимается лишь до 29–30 °С. Однако механически активированное зольное и цементно-зольное вяжущее при этом быстро схватывается и не удовлетворяет по этому показателю требованиям ГОСТ. Предлагаемая нами механохимическая активация предусматривает совместный домол золы с цементом и замедлителем схватывания для обеспечения нормальных сроков схватывания цементно-зольного вяжущего, а также жизнеспособности и удобоукладываемости бетонных смесей на ЦЗВ.

Для замедления сроков схватывания исследовалось несколько видов замедлителей схватывания цемента и гипса. Однако ни один из традиционных замедлителей не остановил быстрой гидратации механически активированной золы. Хорошие результаты были получены при использовании гипсового камня (ГК) – доступного и дешевого природного материала. Он регулирует сроки схватывания в необходимых пределах при оптимальном сочетании ГК с золой в ЦЗВ (рис. 3). В результате рентгенофазового анализа установлено, что гипсовый камень выполняет такую же функцию в зольном вяжущем, как и в портландцементе, связывая трехкальциевый алюминат, присутствующий в виде клинкерного минерала в золе. При этом было определено, что чистая механохимически активированная зола при введении гипсового камня существенно повышает свою прочность на 28-е сутки твердения: с 12 до 24 МПа, т.е. в 2 раза. Результаты исследования позволили предположить, что механизм быстрого схватывания золы может быть связан и с наличием негашеной извести  $\text{CaO}$ , которая уменьшает свою растворимость в присутствии одноименного катиона  $\text{Ca}^{+2}$ , образующегося из более растворимого гипса.

Из табл. 1 видно, что при увеличении содержания гипсового камня в ЦЗВ наступление начала схватывания отодвигается от 1 часа 25 мин до 3 и более часов, что соответствует Евростандарту EN 196-3 «Методы испытания цемента – Часть 3: Определение времени схватывания и постоянства объема цемента». Установлено, что более

высокое содержание золы в ЦЗВ требует пропорционального увеличения химически-активного замедлителя схватывания и твердения – гипсового камня.

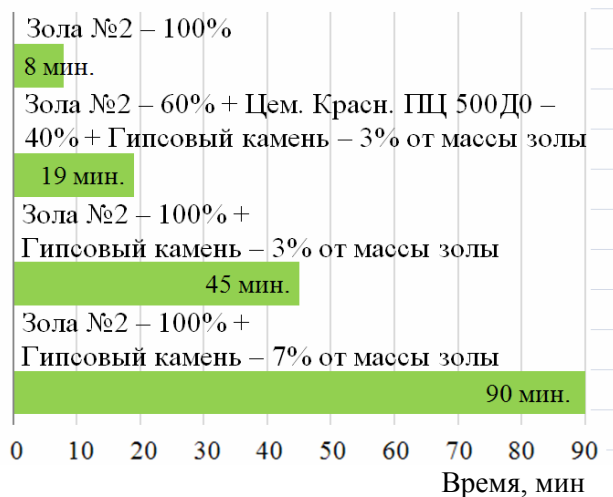


Рис. 3. Начало схватывания зольного и цементно-зольного теста на основе золы-уноса №2

Т а б л и ц а 1

Сроки схватывания цементно-зольного вяжущего с гипсовым камнем

Компоненты суспензии	$S_{уд}$ , см <sup>2</sup> /г	На конусе Хегерманна с ГП Melflux 5581 F (1 % от массы ЦЗВ)		Н.С., мин	К.С., мин
		В/Т	Распływ, мм		
Зола №1 – 30 % Цем. Красн. М500Д0 – 70 % Гипсовый камень – 3 % <sup>3</sup>	6000	0,2	360	85	126
Зола №1 – 40 % Цем. Красн. М500Д0 – 60 % Гипсовый камень – 5 % <sup>3</sup>	5400	0,214	380	103	133
Зола №1 – 50 % Цем. Красн. М500Д0 – 50 % Гипсовый камень – 5 % <sup>3</sup>	6080	0,209	350	116	138
Зола №1 – 60 % Цем. Красн. М500Д0 – 40 % Гипсовый камень – 6 % <sup>3</sup>	5800	0,215	410	165	223
Зола №1 – 70 % Цем. Красн. М500Д0 – 30 % Гипсовый камень – 7 % <sup>3</sup>	6060	0,211	370	Более 180	Более 250

Таким образом, введение гипсового камня позволило качественно изменить формирование прочности и, самое главное, – увеличить долю золы в композиционном вяжущем от 50 до 70–80 %.

При соотношении «цемент : зола» как 30 : 70 по массе (табл. 2) была получена самоуплотняющаяся бетонная смесь нового поколения для полужесткой технологии. Получен бетон с маркой по прочности М1000 при расходе цемента 147 кг на 1 м<sup>3</sup>. Такие низкие расходы цемента находятся выше уровня мировых достижений в технологии бетонов. При производстве бетонов старого поколения при аналогичном расходе цемента можно было получать бетон с маркой по прочности при сжатии не более М75, т.е. в 14 раз меньшей. Удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии ( $C_{R}^{уд}$ ) возрастает в таком бетоне до 19 кг/МПа. Важно, что в бетонах старого поколения с низкими удельными расходами и очень малым содержанием суспензионной составляющей могут быть получены лишь жесткие бетонные смеси, нуждающиеся в интенсивном вибрационном уплотнении со значительными затратами энергии.

## Реакционно-порошково-щебеночный бетон на цементно-зольном вяжущем

Состав бетонной смеси	Масса (кг) объем (л) на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси	Параметры		Прочность на изгиб и прочность при одноосном сжатии, $R_{изг}$ , $R_{сж}$ , МПа, через:			
				6,5 час.	1 сут.	7 сут.	28 сут.
Цементно-зольное вяжущее: цемент Красноярский М500 Д0 (Ц) – 30 %; зола №2 (З) – 70 %; гипс. камень (ГК) – 3 % от массы золы	$\frac{490,0}{163,0}$	В/В=0,290		$R_{изг}=1,1$	$R_{изг}=4,6$	$R_{изг}=8,7$	$R_{изг}=9,2$
		В/Т=0,060					
		$\rho_{вл}=2430$ кг/м <sup>3</sup>					
Гиперпластификатор Хидетал 9γ 1,2 % от ЦЗВ	$\frac{5,9}{5,4}$	н.с. 20 мин. к.с. 40 мин.		$R_{сж}=5$	$R_{сж}=21$	$R_{сж}=66$	$R_{сж}=102$
Отсев рядового песка (г. Красноярск) 0–0,63 мм (Пт)	$\frac{420,0}{158,0}$	Температура помещения 22,5 °С		$C_{вд}^V=31,0\%$ $C_{вдт}^V=47,0\%$ $C_{раст}^V=67,0\%$	$I_{вд}^{Пт}=1,95$ $I_{вдт}^{Пз}=2,41$ $I_{раст}^{Ш}=3,42$		
Песок фр. 0,63–5 мм (Пз)	$\frac{513,0}{194,0}$	Живучесть около 20 мин					
Щебень гранитный мытый фр. 5–10 мм (Ш)	$\frac{900,0}{333,0}$	ОК 19,5 см					
Вода	145	$\frac{П_т}{В}$	$\frac{П_з}{В}$				
Масса сухих компонентов	2323,0			$ЦЗВ_{R_c}^{уд}=4,8$ кг/МПа		$Ц_{R_c}^{уд}=1,44$ МПа/кг	
Объем бетонной смеси	993,0	0,9	1,06				

Оценка объемного содержания водно-дисперсной, водно-дисперсно-тонкозернистой и растворной суспензионных составляющих в пластифицированных порошково-активированных щебеночных бетонах нового поколения осуществлялась по формулам

$$C_{вд}^v = \frac{V_{ц} + V_3 + V_в}{V_{бет.см}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

$$C_{вдт}^v = \frac{V_{ц} + V_3 + V_в + V_{пт}}{V_{бет.см}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

$$C_{раст}^v = \frac{V_{ц} + V_3 + V_в + V_{пт} + V_{пз}}{V_{бет.см}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $V_{ц}$  – объем цемента на 1000 л бетонной смеси;  $V_3$  – объем тонкодисперсной золы на 1000 л;  $V_в$  – объем воды на 1000 л;  $V_{пт}$  – объем тонкого песка на 1000 л;  $V_{пз}$  – объем песка-заполнителя на 1000 л;  $V_{бет.см}$  – объем бетонной смеси, 1000 л.

Объемные концентрации исследованных бетонных смесей варьируются в следующих пределах:  $C_{вд}^v$  от 30 до 35 %,  $C_{вдт}^v$  от 46 до 50 % и  $C_{раст}^v$  от 65 до 66 % (табл. 3). Только в двух высокопластичных самоуплотняющихся смесях объемная концентрация водно-дисперсной суспензии практически составляет 35 %. Даже в смесях, жесткая консистенция которых обусловлена изменением содержания гипсового камня и видом золы, объемная концентрация водно-дисперсной суспензии составляет 30 %. Во всех



бетонных смесях оптимального состава объемная концентрация растворной составляющей одинакова и составляет 66 %, что принципиально отличает разработанные бетоны от традиционных, в которых объемные концентрации  $C_{\text{вд}}^V$  и  $C_{\text{раст}}^V$  находятся в пределах 24–26 % и 54–57 % соответственно.

Т а б л и ц а 3

Композиционные порошково-активированные щебеночные бетоны на цементно-зольном вяжущем с ГП Хидетал 9γ (1,2 % от массы ЦЗВ)

Состав и расход вяжущего, водовязущее отношение в бетонной смеси	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\frac{П_Г}{ЦЗВ}$	$\frac{П_З}{ЦЗВ}$	$\frac{Щ}{ЦЗВ}$	$C_{\text{вд}}^V$ , %	$C_{\text{вдг}}^V$ , %	$C_{\text{раст}}^V$ , %	$R_{\text{сж}}^{28}$ , кг/МПа	$\frac{ЦЗВ_{R_c}^{\text{уд}}}{Ц_{R_c}^{\text{уд}}}$ , кг/МПа	ОК, см
Ц:З=30:70 +ГК 5 %3 (583 кг/м <sup>3</sup> ) В/В=0,264	2460	0,69	0,75	1,55	34,7	49,6	65,8	88	$\frac{6,60}{1,99}$	25
Ц:З=40:60 +ГК 5 %3 (589 кг/м <sup>3</sup> ) В/В=0,263	2483	0,69	0,75	1,55	34,8	49,7	65,9	109	$\frac{5,41}{2,16}$	24
Ц:З=30:70 +ГК 5 %3 (491 кг/м <sup>3</sup> ) В/В=0,269	2459	0,87	1,06	1,86	29,9	45,8	65,3	77	$\frac{6,42}{1,91}$	23
Ц:З=40:60 +ГК 3 %3 (494 кг/м <sup>3</sup> ) В/В=0,269	2460	0,87	1,06	1,86	29,9	45,8	65,3	78	$\frac{6,32}{2,53}$	20
Ц:З=30:70 +ГК 7 %3 (479 кг/м <sup>3</sup> ) В/В=0,271	2428	0,87	1,06	1,86	30,0	45,9	65,4	90	$\frac{5,32}{1,60}$	5
Ц:З=50:50 +ГК 4,5 %3 (484 кг/м <sup>3</sup> ) В/В=0,269	2456	0,87	1,06	1,86	29,8	45,8	65,3	111	$\frac{4,38}{1,74}$	20

П р и м е ч а н и е : условные обозначения компонентов вяжущего приведены в табл. 2.

### Список литературы

1. Энтин, З.Б. Зола ТЭС – сырье для цемента и бетона / З.Б. Энтин, Л.С. Нефедова, Н.В. Стржалковская // Цемент и его применение. – 2012. – №2. – С. 40–46.
2. Калашников, В.И. Новые направления использования зол ТЭС в порошково-активированных бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, М.Н. Мороз, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3(17). – С. 22–27.

### References

1. Entin Z.B. TPP ash – the raw material for cement and concrete / Z.B. Entin, L.S. Nefedova, N.V. Strzhalkovskay // Cement and its Applications. – 2012. – №2. – P. 40–46.
2. Kalashnikov V.I. New uses of TPP ash in powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, M.N. Moroz, E.A. Belyakova // Regional architecture and engineering. – 2013. – № 3(17). – P. 22–27.

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

**Жегера Кристина Владимировна**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технологии строительного производства»  
E-mail: jegera@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

**Zhegera Christina Vladimirovna**,  
Postgraduate of the department «Quality  
management and construction technologies»  
E-mail: jegera@yandex.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ МАТЕРИАЛОВ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов, К.В. Жегера

Обобщается опыт использования методов математического программирования при оптимизации структуры и свойств композиционных материалов специального назначения. Особое внимание уделяется методам квадратичного программирования.

*Ключевые слова: строительные материалы, управление качеством, нелинейное и квадратичное программирование.*

## MATHEMATICAL PROGRAMMING IN MANAGING THE MATERIAL QUALITY

I.A. Garkina, A.M. Danilov, Ch.V. Zhegera

We generalize the experience of using mathematical programming methods in optimization of the structure and properties of composite materials for special purposes.

*Keywords: building materials, quality management, nonlinear and quadratic programming.*

В настоящее время при синтезе материалов часто в той или иной мере используются модели частных критериев качества, полученные методами математического планирования эксперимента. Однако сфера приложения этих моделей пока весьма ограничена; модели носят иллюстративный характер и редко используются при прогнозировании свойств. Что касается многокритериальных задач, то, за редким исключением, они завершаются лишь их постановкой. Определенный положительный опыт синтеза материалов как сложных систем был накоплен при разработке композиционных материалов специального назначения [1–5]. Здесь оптимизация их структуры и свойств осуществлялась методом последовательных уступок с использованием полученных методами математического планирования эксперимента зависимостей частных критериев (например, пористости  $q_1$ , %, прочности на сжатие  $q_2$ , МПа) от объемных долей  $x_1 \in [0,5; 0,6]$ ,  $x_2 \in [0,35; 0,4]$  заполнителя и наполнителя:

$$q_1(x_1, x_2) = 196,9 - 1217x_1 + 623,6x_2 - 1064x_1x_2 + 1532x_1^2;$$

$$q_2(x_1, x_2) = -305,3 + 1188x_1 + 57,20x_2 - 1148x_1^2.$$

Таким образом, была получена задача квадратичного программирования (частная задача нелинейного программирования, в которой минимизируется сумма линейной и квадратичной форм при ограничениях вида линейных неравенств и неотрицательности переменных). В общем случае в задаче нелинейного программирования (НЛП) требуется найти значение многомерной переменной  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , минимизирующее целевую функцию  $q(\mathbf{x})$  при условиях, когда на переменную  $\mathbf{x}$  наложены ограничения типа неравенств

$$f_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

а координаты  $x_j$  неотрицательны:

$$x_j \geq 0. \quad (2)$$

При  $f_i(\mathbf{x}) \geq 0 - f_i(\mathbf{x}) \leq 0$ , так что ограничения всегда можно свести к неравенствам одного знака. Если некоторые ограничения входят в задачу со знаком равенства, например  $\varphi(\mathbf{x}) = 0$ , то их можно представить в виде пары неравенств  $\varphi(\mathbf{x}) \leq 0, -\varphi(\mathbf{x}) \leq 0$ , сохранив тем самым типовую формулировку задачи.

При решении задач оптимизации очень важно иметь *необходимые условия*, которым должна удовлетворять точка, оптимизирующая целевую функцию и удовлетворяющая всем ограничениям. Хотя *такие условия обычно не являются достаточными*, но знание их существенно облегчает поиск оптимального решения. В классической задаче *оптимизации без ограничений* на переменные *необходимыми условиями оптимума* являются условия

$$\frac{\partial q(\mathbf{x})}{\partial x_j} = 0, \quad j = \overline{1, n},$$

определяющие стационарные точки целевой функции  $q(\mathbf{x})$ . Простейшая задача НЛП состоит в *минимизации с ограничениями* типа равенств  $f_i(\mathbf{x}) = 0, i = \overline{1, m}$  при неотрицательности переменных  $x_j, j = \overline{1, n}$ . Ее можно рассматривать как *расширение задачи на условный минимум* на случай неотрицательности переменных и для её анализа использовать *функцию Лагранжа*  $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ , определённую соотношением

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = q(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(\mathbf{x}), \quad (3)$$

где  $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ ,  $\lambda_i$  – множители Лагранжа. Здесь имеют место ограничения типа равенств, поэтому справедливы соотношения

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_i} = f_i(\mathbf{x}) = 0, \quad i = \overline{1, m},$$

из которых вытекает, что в точке  $\mathbf{x}$  оптимального решения выполняется соотношение

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = q(\mathbf{x}) \quad (4)$$

(рассмотрение *особенностей функции Лагранжа в окрестности точки оптимального решения можно заменить исследованием целевой функции  $q(\mathbf{x})$* ). Точка  $\mathbf{x}$ , соответствующая *оптимальному решению*, может быть или внутренней, или граничной точкой допустимой области  $x_j \geq 0, j = \overline{1, n}$  (каждая из его компонент, например  $x_j$ , будет удовлетворять либо условию  $x_j > 0$ , либо условию  $x_j = 0$ ). Если  $x_j$  находится не на границе допустимой области, то есть  $x_j > 0$ , то отклонения  $x_j$  возможны как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения  $x_j$ . Но поскольку  $\mathbf{x}$  – оптимальная

точка, то должно быть  $\frac{\partial q(\mathbf{x})}{\partial x_j} = 0$ . Если  $x_j$  лежит на границе допустимой области ( $x_j = 0$ ), то отклонения от оптимальной точки возможны *только в сторону увеличения*

$x_j$  и при этом  $q(\mathbf{x})$  должна увеличиваться ( $\frac{\partial q(\mathbf{x})}{\partial x_j} > 0$ ). Обобщая эти случаи с учё-

том соотношения (4) и добавляя к ним соотношения  $\frac{\partial L(\mathbf{x}, \lambda)}{\partial x_j} = 0, j = \overline{1, n}$ , необхо-

димые условия того, что точка  $\mathbf{x}$  является решением рассмотренной задачи оптимизации, можно записать в виде

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \lambda)}{\partial x_j} \begin{cases} = 0, & \text{если } x_j > 0, \\ > 0, & \text{если } x_j = 0, \end{cases} j = \overline{1, n}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \lambda)}{\partial \lambda_i} = 0, i = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Сформулируем далее *необходимые условия того, что в точке  $\mathbf{x}$  достигается оптимальное решение задачи НЛП (минимизируется  $q(\mathbf{x})$  при ограничениях (1) и (2))*.

Предварительно упростим задачу, заменив каждое ограничение (неравенство типа (1)) на равенство путём введения добавочных неотрицательных переменных  $z_i$ . Ограничения запишутся в виде

$$f_i(\mathbf{x}) + z_i = 0, z_i \geq 0, x_j \geq 0, z_i \begin{cases} > 0, & \text{если } f_i(\mathbf{x}) < 0, \\ = 0, & \text{если } f_i(\mathbf{x}) = 0. \end{cases}$$

Задача свелась к задаче с ограничениями типа равенств, с  $n + m$  переменными  $x_j, z_i, j = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}$  и с функцией Лагранжа

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \lambda) = q(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i [f_i(\mathbf{x}) + z_i].$$

Условия, которым должны удовлетворять значения  $x_j$  и  $z_i$  в точке оптимума, будут выражаться соотношениями (5) и (6) для функции  $L(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \lambda)$ . Условие (5), применённое к переменной  $z_i$ , даёт

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \lambda)}{\partial z_i} = \lambda_i \begin{cases} = 0, & \text{если } z_i > 0, \\ > 0, & \text{если } z_i = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Это соотношение вводит ограничения на множители Лагранжа  $\lambda_i$ . Из него следует, что в функцию  $L(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \lambda)$  не будут входить ограничения типа неравенств (так как для них  $\lambda_i = 0$ ), а ограничения типа равенств, соответствующие  $z_i = 0$ , будут входить с  $\lambda_i > 0$ . Поэтому функция Лагранжа  $L(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \lambda)$  фактически совпадает с функцией Лагранжа  $L(\mathbf{x}, \lambda)$ , определяемой соотношением (3). При этом условие оптимальности (5) применительно к переменным  $x_j$  сохраняет свой вид.

Из  $\frac{\partial L(\mathbf{x}, \lambda)}{\partial \lambda_i} = f_i(\mathbf{x})$  с учетом ограничений на  $\lambda_i$ , вытекающих из (7), условия, которым должна удовлетворять точка  $\mathbf{x}$ , являющаяся решением общей задачи НЛП, окончательно можно записать в виде

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \lambda)}{\partial x_j} \begin{cases} > 0, & \text{если } x_j = 0, \\ = 0, & \text{если } x_j > 0, \end{cases} j = \overline{1, n}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_i} \begin{cases} > 0, & \text{если } \lambda_i = 0, \\ = 0, & \text{если } \lambda_i > 0, \end{cases} \quad i = \overline{1, m}. \quad (9)$$

Условия (8) и (9) называются условиями Куна – Таккера. Введя

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial x_j} = p_j; \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = -q_i, \quad (10)$$

их можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} x_j &\geq 0, \quad p_j \geq 0, \quad x_j p_j = 0, \quad j = \overline{1, n}, \\ \lambda_i &\geq 0, \quad q_i \geq 0, \quad \lambda_i q_i = 0, \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Возможна и другая интерпретация условий Куна – Таккера, связанная с понятием седловой точки функции Лагранжа  $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$  (точка  $(\mathbf{x}_0, \boldsymbol{\lambda}_0)$ ), в которой функция  $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$  достигает минимума по  $\mathbf{x}$  и максимума по  $\boldsymbol{\lambda}$ ). Удовлетворяются условия

$$L(\mathbf{x}_0, \boldsymbol{\lambda}) \leq L(\mathbf{x}_0, \boldsymbol{\lambda}_0) \leq L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}_0). \quad (12)$$

Так что задача НЛП может рассматриваться и как задача определения седловых точек функции Лагранжа.

За исключением задачи квадратичного программирования для общего случая задачи НЛП пока не существует эффективных вычислительных методов. Именно этим в большинстве случаев и определяется распространенность использования квадратичных моделей для частных критериев (обычно свойств). Здесь оптимизационная задача представляется в виде:

$$\begin{aligned} q(\mathbf{x}) &= \sum_j c_j x_j + \sum_j \sum_k d_{jk} x_j x_k = \min; \\ \sum_k a_{ik} x_k - b_i &\leq 0, \quad i = \overline{1, m}; \\ x_j &\geq 0, \quad j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (13)$$

Отметим, эффективный вычислительный метод для решения этой задачи (как и большинства задач НЛП) можно найти лишь в случаях, когда целевая функция имеет единственный оптимум (он же является и глобальным). Когда квадратичная форма является положительно определённой, она будет выпуклой (функция  $f(\mathbf{x})$  является выпуклой, если при любом  $0 \leq \lambda \leq 1$  справедливо  $f[\lambda \mathbf{x}_1 + (1-\lambda) \mathbf{x}_2] \leq \lambda f(\mathbf{x}_1) + (1-\lambda) f(\mathbf{x}_2)$ ). Выпуклой функцией является и линейная форма. Поэтому целевая функция в (13) будет выпуклой, а необходимые условия Куна – Таккера будут и достаточными условиями существования единственного оптимума.

При записи условий Куна – Таккера можно воспользоваться функцией Лагранжа. В соответствии с (3) и (13)

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_j c_j x_j + \sum_j \sum_k d_{jk} x_j x_k + \sum_i \lambda_i \left( \sum_k a_{ik} x_k - b_i \right).$$

Производные от  $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$  по  $x_j$  и  $\lambda_i$  в соответствии с (10) запишутся в виде

$$\begin{aligned} c_j + 2 \sum_k d_{jk} x_k + \sum_i \lambda_i a_{ij} &= p_j, \quad j = \overline{1, n}; \\ b_i - \sum_k a_{ik} x_k &= q_i, \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (14)$$

Условиями Куна – Таккера требуется найти решения уравнений (14) при удовлетворении требований (11), которые лучше представить в виде

$$\begin{aligned} x_j p_j = 0, \quad \lambda_i q_i = 0, \quad x_j \geq 0; \\ \lambda_i \geq 0, \quad p_j \geq 0, \quad q_i \geq 0; \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (15)$$

Сделаем ряд важных замечаний. Классическая задача оптимизации состоит в нахождении минимума целевой функции  $q(\mathbf{x})$ , где  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – точка в пространстве  $R^n$ , при наличии ограничений типа равенств  $f_i(\mathbf{x}) = 0, i = \overline{1, m}, m < n$ . При наличии ограничений минимум функции  $q(\mathbf{x})$  будет *условным*; при их отсутствии – *безусловным*, нахождение которого сводится к определению и исследованию стационарных точек функции  $q(\mathbf{x})$ .

Классический способ решения данной задачи состоит в том, что уравнения  $f_i(\mathbf{x}) = 0, i = \overline{1, m}, m < n$  используются для исключения из рассмотрения  $m$  переменных. При этом целевая функция приводится к виду

$$q(x_1, x_2, \dots, x_n) = q_1(y_1, y_2, \dots, y_{n-m}),$$

где через  $y_1, y_2, \dots, y_{n-m}$  обозначены неисключённые переменные. Задача сводится к нахождению значений  $y_1, y_2, \dots, y_{n-m}$ , которые обращают в минимум функцию  $q_1$  и на которые не наложено никаких ограничений, то есть к задаче на безусловный экстремум.

Если ограничения имеют сложный вид, то исключение с их помощью  $m$  переменных из функции  $q(\mathbf{x})$  представляет значительные трудности. В связи с этим задачи на условный экстремум и сводятся к задаче на безусловный экстремум с использованием функции Лагранжа.

В рассматриваемом случае система (14) содержит  $n + m$  уравнений с  $2(n + m)$  переменными  $x_j, \lambda_i, p_j, q_i$ , из которых  $n + m$  являются свободными и могут быть приравнены к нулю. Остальные переменные образуют при этом базисное решение, которое является допустимым, если выполняются условия (15).

Если число переменных в задаче невелико, то можно попытаться угадать допустимое базисное решение, положив произвольные  $n + m$  переменных свободными, приравняв их нулю и, решив систему (15), найти значения базисных переменных. Однако нет никаких гарантий, что полученные значения переменных будут удовлетворять условиям (15). Поэтому попытки угадать допустимое базисное решение приходится проводить многократно.

Если допустимое базисное решение найдено, то его улучшение, то есть переход к новому лучшему базису, можно осуществить симплекс-методом. При выборе новой базисной переменной необходимо проверять выполнение условий  $x_j p_j = 0, \lambda_i q_i = 0$ , которые означают, что если в базисе имеется  $x_j$  или  $\lambda_i$ , то в него не может быть введено  $p_j$  или  $q_i$  соответственно.

При большом числе переменных метод «угадывания» допустимого базисного решения становится чрезвычайно трудоёмким. В этом случае можно использовать эффективные систематические методы получения допустимого базисного решения, изложенные в [6].

Если в формулировке задачи квадратичного программирования линейные ограничения записаны в виде  $A\mathbf{x}^T = \mathbf{b}^T$ , то условия Куна – Таккера запишутся в виде соотношений (5), (6). Условие (6) означает, что в соотношениях (14) и (15) должно быть принято  $q_i = 0, i = \overline{1, m}$ . Это значительно упрощает решение задачи, так как применение симплекс-метода потребует проверки условия  $x_j p_j = 0$ .

В качестве иллюстрации приведем определение максимального значения прочности композита на сжатие  $R_{сж} = 2x_1 + 4x_2 - x_1^2 - 2x_2^2$  (равносильно определению минимального значения целевой функции  $q = -2x_1 - 4x_2 + x_1^2 + 2x_2^2$ ) при ограничениях на значения факторов

$$x_1 + 2x_2 - 8 \leq 0, \quad 2x_1 - x_2 - 12 \leq 0, \quad x_1, x_2 \geq 0.$$

Функция  $q(x_1, x_2)$  является выпуклой, как сумма линейной функции  $y = -2x_1 - 4x_2$  (выпуклая) и квадратичной формы  $y = x_1^2 + 2x_2^2$  (положительно-определенная и, следовательно, также выпуклая). Система ограничений задачи включает только линейные неравенства.

Воспользуемся теоремой Куна – Таккера. Составим функцию Лагранжа

$$L(x_1, x_2, \lambda_1, \lambda_2) = -2x_1 - 4x_2 + x_1^2 + 2x_2^2 + \lambda_1(x_1 + 2x_2 - 8) + \lambda_2(2x_1 - x_2 - 12)$$

и запишем необходимые и достаточные условия существования седловой точки построенной функции:

$$\begin{aligned} p_1 = \frac{\partial L}{\partial x_1} = -2 + 2x_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 \geq 0, \quad p_2 = \frac{\partial L}{\partial x_2} = -4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2 \geq 0; \\ -q_1 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = x_1 + 2x_2 - 8 \leq 0, \quad -q_2 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = 2x_1 - x_2 - 12 \leq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} x_1 p_1 = x_1(-2 + 2x_1 + \lambda_1 + \lambda_2) = 0, \quad x_2 p_2 = x_2(-4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2) = 0; \\ \lambda_1 q_1 = -\lambda_1(x_1 + 2x_2 - 8) = 0, \quad \lambda_2 q_2 = -\lambda_2(2x_1 - x_2 - 12) = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Введя дополнительные неотрицательные переменные  $v_1, v_2, w_1, w_2$ , обращающие неравенства (16) в равенства, получим:

$$\begin{aligned} p_1 - v_1 = -2 + 2x_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 - v_1 = 0, \\ p_2 - v_2 = -4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2 - v_2 = 0; \\ -q_1 + w_1 = -8 + x_1 + 2x_2 + w_1 = 0, \\ -q_2 + w_2 = -12 + 2x_1 - x_2 + w_2 = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Если определить базисное решение системы линейных уравнений (18) с учетом выполнения равенств (17), то будет получена седловая точка функции Лагранжа для исходной задачи (оптимальное решение).

Из (18) следует:

$$x_1 = 1 - \frac{1}{2}\lambda_1 - \lambda_2 + \frac{1}{2}v_1, \quad x_2 = 1 - \frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{1}{4}\lambda_2 + \frac{1}{4}v_2; \quad (19)$$

$$w_1 = 5 + \frac{3}{2}\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}v_1 - \frac{1}{2}v_2, \quad w_2 = 11 + \frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{5}{4}\lambda_2 - v_1 + \frac{1}{4}v_2.$$

Тогда базисное решение:

$$\begin{aligned} \lambda_1 = \lambda_2 = v_1 = v_2 = 0; \\ x_1 = 1, \quad x_2 = 1, \quad w_1 = 5, \quad w_2 = 11. \end{aligned} \quad (20)$$

При этом

$$\begin{aligned} p_1 = v_1 = 0, \quad p_2 = v_2 = 0; \\ q_1 = w_1 = 5, \quad q_2 = w_2 = 11. \end{aligned} \quad (21)$$



Отсюда справедливы условия

$$\begin{aligned} x_1 p_1 = 0, x_2 p_2 = 0; \quad \lambda_1 q_1 = 0, \lambda_2 q_2 = 0; \\ x_1, x_2 \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0, p_1, p_2 \geq 0, q_1, q_2 \geq 0. \end{aligned} \quad (22)$$

С учетом (11), (21), (22) седловая точка функции Лагранжа для исходной задачи есть точка  $(x_1^0, x_2^0, \lambda_1^0, \lambda_2^0) = (1, 1, 0, 0)$ . Следовательно,  $x^*(1, 1) =$  оптимальный план исходной задачи и  $q_{\min} = -3$ ;  $(R_{\text{сж}})_{\max} = 3$ .

Примеры практического использования квадратичного программирования для оптимизации структуры и свойств композиционных материалов специального назначения приводятся в [2, 4, 7, 8].

#### Список литературы

1. Воробьев, В.А. Основные задачи компьютерного материаловедения строительных композитов / В.А. Воробьев, А.В. Илюхин // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С.19–21.
2. Баженов, Ю.М. 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.
3. Выровой, В.Н. Структура, свойства, состояния / В.Н. Выровой, А.Н. Гергега // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Зовнішрекамсервіс, 2007. – Вип. № 27. – С.78–84.
4. Гарькина, И.А. Управление качеством материалов со специальными свойствами / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Проблемы управления. – 2008. – № 6. – С. 67–74.
5. Гарькина, И.А. Строительные материалы как системы / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С.55–58.
6. Данилов, А.М. Системы и модели: моногр. / А.М. Данилов. – Пенза: ПГАСИ, 1995. – 200 с.
7. Будылина, Е.А. Моделирование с позиций управления в технических системах / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2 (16). – С. 138–142.
8. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия ВУЗов. Строительство. – 2011. – №1. – С.80–85.

#### References

1. Vorobyev, V.A. The main tasks in computer study of building materials / V.A. Vorobyev, A.V. Iluhin // Building Materials. – 2006. – № 7. – P.19–21.
2. Bazhenov, Yu.M. Systems analysis in building materials: monogr. / 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.
3. Vyrovoy, V.N. The structure, properties and state / V.N. Vyrovoy, A.N. Gerega // Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odessa: Zovnishrekamservic, 2007. – Vol. Number 27.– P.78–84.
4. Garkina, I.A. Quality management of the materials of special properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Control Sciences. – 2008. – №6. – P. 67–74.
5. Danilov, A.M. Systems and models: monog. / A.M. Danilov. – Penza: PGASI, 1995. – 200 p.
6. Garkina, I.A. Building materials as systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Y.V. Korolev // Building materials. – 2006. – №7. – P. 55–58.
7. Budylyna, E.A. Modeling from the position of management in technical systems / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and construction. – 2013. – № 2 (16). – P. 138–142.
8. Danilov, A.M. The methodology of designing complex systems for the development of materials special purpose / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Proceedings of the higher education institutions. Building. – 2011. – № 1. – P. 80-85.

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

**Вернигорова Вера Никифоровна**,  
доктор химических наук, профессор  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»

**Вернигоров Михаил Михайлович**,  
студент ИСТ-41/3

**Саденко Денис Сергеевич**,  
младший научный сотрудник НИС

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Vernigorova Vera Nikiforovna**,  
Doctor of Science in Chemistry, Professor  
of the department «Technology of building  
materials and wood processing»

**Vernigorov Mikhail Mikhaylovich**,  
student IST-41/3

**Sadenko Denis Sergeevich**,  
junior research associate scientific research  
sector

## МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ

В.Н. Вернигорова, М.М. Вернигоров, Д.С. Саденко

Рассматривается вопрос влияния добавки катиона активного вещества «алкамон-ОС» на морфологию поверхности частиц гидросиликатов кальция (ГСК) при температурах 30 и 75 °С и при одной и той же концентрации добавки ОС-2. Показано, что температура воздействует на адсорбцию и конформацию молекул алкамона ОС-2, тем самым оказывая влияние и на морфологию поверхности ГСК.

*Ключевые слова: гидросиликаты кальция (ГСК), морфология поверхности, наночастицы, добавка ПАВ, электронный микроскоп, адсорбция, конформация молекул ПАВ.*

## SURFACE MORPHOLOGY OF CALCIUM HYDROSILICATES

V.N. Vernigorova, M.M. Vernigorov, D.S. Sadenko

The article discusses the effects of cation additive active substance «alkamon-OS» surface morphology of particles of calcium hydrosilicates (GSK) at temperatures of 30 and 75 °C and at the same concentration of additive OS 2. It is shown that the temperature influences the adsorption and conformation of molecules alkamon OS-2, thereby exerting influence on the surface morphology of the HSC.

*Keywords: calcium hydrosilicate, surface morphology, electronic microscope, nanoparticles, adsorption, SAS molecules conformation.*

### Введение

Рассматривается морфология поверхности частиц ГСК, полученных с добавкой низкомолекулярного катионоактивного ПАВ – алкамона ОС-2. Исследования проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа при увеличении в 50000 крат.

Показано, что на морфологию поверхности частиц ГСК оказывает влияние температура. При температуре 30 °С нанорельеф поверхности блочный, разориентированный, с неоднородным гранулометрическим составом. Размеры частиц от 2 до 10 нм и от 16 до 50 нм. При температуре 75 °С нанорельеф поверхности с более разориентированным расположением наночастиц. Размеры частиц от 2 до 10 нм; от 10 до 24 нм; от 24 до 40 и 50 нм.

Установлено, что температура оказывает влияние на морфологию поверхности частиц ГСК. Нанорельеф при повышении температуры становится более разупорядоченным.

### Теоретическая часть

Гидросиликаты кальция являются основным связующим веществом в бетонах на портландцементной основе, в том числе и в малоцементных бетонах. При замешивании портландцементной смеси с водой формируется несколько физико-химических систем, в том числе и система  $\text{CaO-SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ , так как содержание в портландцементе силикатов кальция составляет около 87 %. Строительное материаловедение и производство строительных материалов постепенно переходят на рельсы нанотехнологий. Это связано с тем, что без четкого понимания структуры и свойств новых материалов на наноуровне, а также влияния наноструктуры на такие макроскопические свойства, как усадка, пластичность, прочность, строение и процесс гидратации, невозможно создавать инновационные строительные материалы с заданными и прогнозируемыми свойствами. Нанотехнологии определяются как совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность создавать контролируемым образом и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, хотя бы в одном измерении, и в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба [1]. Свойства материалов и веществ в нанометровом масштабе от 1 до менее 100 нм отличаются от свойств атомов и молекул и тем более от объемных свойств материала, состоящего из этих атомов или молекул. Бетонная смесь включает несколько компонентов и при замешивании с водой превращается в высококонцентрированную суспензию. В действительности при протекании процесса гидратации бетонная смесь превращается в мультиреакционную систему, в которой каждая частица портландцемента взаимодействует с водой. Одним из способов, обеспечивающих возможность контролируемым образом наномодифицировать поверхность частиц ГСК, является введение в реакционную систему добавок низкомолекулярных поверхностно-активных веществ (ПАВ).

### Экспериментальная часть

Была поставлена задача: исследовать морфологию поверхности частиц синтезированных ГСК, определить размеры частиц, их форму и распределение. ГСК синтезировали в модельной системе  $\text{CaO-SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  с использованием химически чистых  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  при температурах 30 и 75 °С с добавкой катионоактивного ПАВ «алкамон ОС-2», имеющего химическую формулу:  $[\text{C}_2\text{H}_{2n+1}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_2\text{O})_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)(\text{C}_2\text{H}_5)_2][\text{C}_6\text{H}_5\text{SO}_3]$  (алкилдиоксиэтилен) – метилдиэтиламмоний бензосульфат, где  $n=16-18$ . Длинная углеводородная цепь содержит активные функциональные группы, содержащие атомы кислорода, азота, серы и жесткое бензольное ядро с сопряженной  $\pi$ -системой электронов. Молекулярная масса алкамона ОС-2 составляет 547 г/моль, а критическая концентрация мицеллообразования (ККМ)=3 г/дм<sup>3</sup>. Алкамон ОС-2 диссоциирует на маленький анион и крупный гидрофобный положительно заряженный катион.

Синтез ГСК вели в течение 14 суток. Для определения размеров частиц и их распределения был использован просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) высокого разрешения. Исследования проводили методом одноступенчатой реплики. На частицы ГСК наносили угольную реплику толщиной около 10 нм, что регулировалось по цвету. Время напыления реплики составляло 23 с. Напыление производили на электронно-микроскопическом poste ЭВП-2. Травление угольной реплики осуществляли в плавиковой кислоте. Съемка электронных фотографий ГСК производилась с увеличением в 50000 крат. Это значит, что на фотографии 5,0 см соответствуют 1 мк, или 1000 ангстрем, или 100 нм.

На рис. 1 приведена электронная фотография ГСК, полученных с добавкой алкамона ОС-2 при ее концентрации, равной 250 мг/дм<sup>3</sup>, и при температуре 30 °С. Из рис.1 следует, что морфология поверхности частиц представляет собой аморфные гелеобразные блоки, не имеющие определенной формы. Размеры блоков 40 и 50 нм. Внутри блоков просматриваются неоднородные сетчатые структуры размером 40 и 46 нм. Субструктура состоит из наночастиц размером 2 и 4 нм. На поверхности образцов ГСК имеются свободные объемы; наночастицы в субструктуре окружены дислокациями.

На рис. 2 показана электронная фотография ГСК, полученных с добавкой алкамона ОС-2 при температуре 75 °С с увеличением в 50000 крат. Из рис. 2 следует, что морфология поверхности частиц ГСК представляет собой нанорельеф бугристо-ноздреватый, расчлененный, с кавернами и трещинами. Наночастицы имеют разные размеры. Гранулометрический состав рельефа неоднородный и включает фракции: 2-6 нм, 6-10 нм, 10-24 нм, 24-40 нм, 40-50 нм.

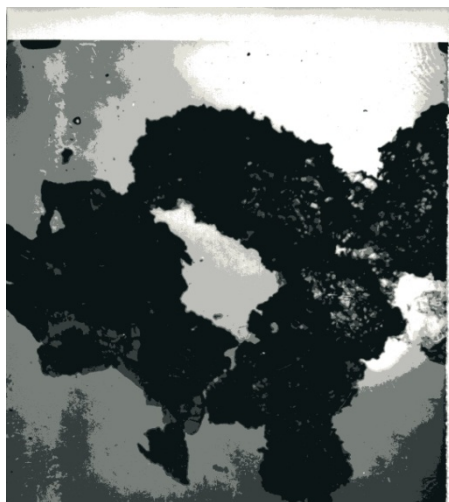


Рис. 1. Электронная фотография ГСК, полученных с добавкой алкамона ОС-2 при температуре 30 °С с увеличением в 50000 крат и при концентрации 250 мг/дм<sup>3</sup>

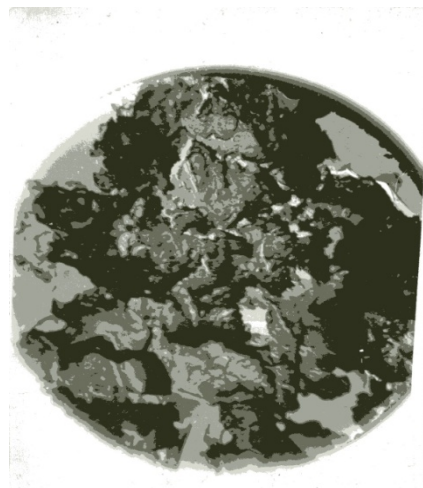
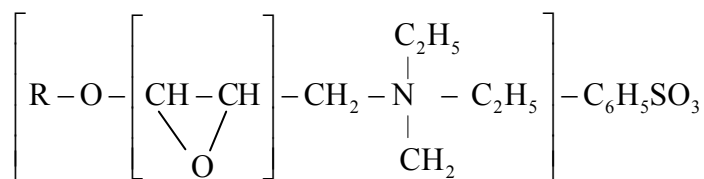


Рис. 2. Электронная фотография ГСК, полученных с добавкой алкамона ОС-2 при температуре 75 °С с увеличением в 50000 крат и при концентрации 250 мг/дм<sup>3</sup>

Таким образом, с одной и той же добавкой, но при разных температурах морфология поверхности частиц ГСК разная. Однако при значительном различии в микроморфологии поверхности ГСК порядок величины структурных элементов при температуре 30 и 75 °С одинаков. Морфология или микрорельеф поверхности отражает границу взаимодействия структуры кристалла со структурой среды, являющейся водным раствором алкамона ОС-2. Различная морфология поверхности кристаллов ГСК показывает, что на их синтез и кристаллическую структуру оказывают влияние условия их образования. Молекулы ОС-2 дифильны; поэтому строение молекулы анизотропно:



Из схемы видно, что молекулы ОС-2 имеют линейное строение. Основными структурными единицами молекулы являются углеводородный радикал, содержащий 18 атомов углерода, гетероциклические фрагменты, состоящие из атомов кислорода, азота и серы с неподеленными парами электронов, и бензольное ядро. Наличие бензольного ядра делает молекулу частично жесткоцепной. Углеводородный радикал гидрофобен, не взаимодействует с молекулами воды, и это является причиной самоорганизации молекул ОС-2, которые скручиваются в рыхлый клубок, внутри которого сосредоточивается гидрофобная часть, а полярные атомы кислорода, азота, серы и бензольное ядро с π-системой электронов оказываются на поверхности рыхлого клубка, взаимодействуют с полярными молекулами воды. Поскольку молекулы ОС-2 дифильны, то они способны адсорбироваться на поверхности частиц портландцемента и понижать поверхностное натяжение. Так как полярные атомы гетероцепной части

ОС-2 находятся на расстоянии друг от друга, равном 0,3-0,4 нм, то образующаяся при адсорбции рыхлая пленка на поверхности частиц как мембрана пропускает молекулы воды к поверхности частиц СаО и SiO<sub>2</sub>. Размеры наночастиц ГСК составляют от 2 до 50 нм; поэтому это истинные наногидросиликаты кальция. Морфология поверхности частиц ГСК при разных температурах различна. Это значит, что температура оказывает влияние на адсорбцию и на конформацию молекул алкамона ОС-2. При температуре 30 °С связь молекул ОС-2 с поверхностью частиц довольно сильная; образующаяся рыхлая пленка однородна, молекулы воды поступают к поверхности беспрепятственно, и формируется аморфная структура с кристаллическими выделениями наногидросиликатов кальция.

При температуре 75 °С наблюдается расчлененный микрорельеф. Это объясняется тем, что при температуре 75 °С связь молекул ОС-2 с поверхностью частиц СаО и SiO<sub>2</sub> ослабляется. Молекулы ОС-2 начинают перемещаться на поверхности, и в рыхлой пленке появляются разрывы. Там, где есть пленка, там формируются нанокристаллы ГСК, там, где разрывы, – там провалы с дислокациями.

#### Выводы

1. Морфология поверхности ГСК зависит от характера адсорбции частиц ГСК на поверхности частиц СаО и SiO<sub>2</sub>.
2. Температура оказывает влияние на конформацию и адсорбцию молекул алкамона ОС-2, вследствие чего при одной и той же добавке и при одной и той же ее концентрации морфология поверхности частиц разная.
3. При обеих температурах формируются два типа наночастиц: частицы упорядоченного строения размером от 2 до 5 нм, содержащие до 1000 атомов (нанокластеры), и наночастицы диаметром от 10 до 50 нм, состоящие из 10<sup>3</sup>-10<sup>6</sup> атомов.
4. Из рис. 1 и 2 следует, что наночастицы имеют сложную форму и строение; поэтому в качестве характеристического следует брать не линейный размер в целом, а размер её структурного элемента.
5. Наночастицы ГСК, полученные с добавкой алкамона ОС-2 являются наноструктурами.

#### Список литературы

1. Вернигорова, В.Н. Морфология поверхности гидросиликатов кальция / В.Н. Вернигорова, Д.С. Саденко, М.М. Вернигор // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №2. – С. 62–65.
2. Вернигорова, В.Н. Физико-химические основы материаловедения дисперсных строительных материалов. Ч.II. / В.Н. Вернигорова, С.М. Саденко. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 230 с.
3. Малинецкий, Г.Г. Нанотехнологии. От алхимии к химии и дальше / Г.Г. Малинецкий // Интеграл. – М., 2007. – №5. – С. 4–5.

#### References

1. Vernigorova, V.N. The surface morphology of calcium Hydrosilicates / V.N. Vernigorova, D.S. Sadenko, M.M. Vernigor // Regional architecture and construction. – 2012. – № 2. – P. 62–65.
2. Vernigorova, V.N. Physico-chemical basis of dispersed materials of construction materials. Part II / V.N. Vernigorova, S.M. Sadenko.– Penza: PGUAS, 2011. – 230 p.
3. Malinetskii, G.G. Nanotechnology. From alchemy to chemistry and on / G.G. Malinetskii // Integral. – M., 2007. – № 5. – P. 4–5.

УДК 691.342

*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», президент  
Научно-технического общества строителей  
Республики Мордовия  
E-mail: ntorm80@mail.ru

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Данилов Александр Максимович**,  
доктор технических наук, профессор,  
советник РААСН, зав. кафедрой  
«Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Круглова Альбина Николаевна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: albinakruglova@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», President of Scientific  
and Technical Society of the Mordovia  
Republic  
E-mail: ntorm80@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

**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

**Kruglova Al'bina Nicolaevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Mathematics and  
Mathematical Modeling»  
E-mail: albinakruglova@yandex.ru

## СТРУКТУРА НАПОЛНЕННОГО ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО. ОПТИЧЕСКАЯ И СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

А.М. Данилов, В.П. Селяев, А.Н. Круглова

Представлены результаты исследований структуры наполненных эпоксидных связующих методами оптической и сканирующей зондовой микроскопии. Проведена количественная оценка результатов с использованием скалярных критериев.

*Ключевые слова: эпоксидное связующее, оптическая и сканирующая зондовая микроскопия, фрактальная размерность.*

## THE STRUCTURE OF FILLED EPOXY BINDER. OPTICAL AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

A.M. Danilov, V.P. Seljaev, A.N. Kruglova

The results of studies on the structure of filled epoxy binder by optical and scanning probe microscopy are submitted. A quantitative evaluation of the results using the scalar criteria is considered.

*Keywords: epoxy binder, optical and scanning probe microscopy, fractal dimension.*

Анализ взаимного расположения частиц в композите часто производят на основе микрофотографий. Возможна различная классификация методов микроскопии. Обычно она производится исходя из вида и характеристик (энергетических) излучения (волнового или корпускулярного), взаимодействующего с объектом исследования. Так, оптическая микроскопия основана на регистрации электромагнитных квантов

видимого диапазона и т.д. Вне данной классификации находятся разновидности сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), основанной на том или ином взаимодействии наноразмерного зонда с поверхностью исследуемого объекта. Разновидностью СЗМ является атомно-силовая микроскопия (АСМ), основанная на ван-дер-ваальсовом взаимодействии между твёрдотельным зондом, приближенным к объекту исследования на расстояние от единиц до сотен нанометров, и поверхностью образца. В настоящее время АСМ используется в широком диапазоне приложений, в том числе для анализа шероховатости поверхности. Атомно-силовые микроскопы могут применяться для построения трехмерных изображений объектов (от атомных масштабов до микронных образований). АСМ регистрирует трехмерные параметры с возможностью однозначной идентификации выступов и впадин.

Приведем результаты исследования распределения частиц аппретированного наполнителя методами оптической и сканирующей зондовой микроскопии. Отметим, что прозрачность наполненного связующего при объемной степени наполнения  $v_f \geq 0,05$  не позволяет проводить исследования в проходящем свете. При испытании композиций в отражённом свете контраст получаемых изображений слишком низок. Поэтому в процессе экспериментов объёмная степень наполнения композиции принималась  $v_f = 0,01$ . Микрофотографии отверждённой композиции в отражённом свете приведены на рис. 1 и 2. Их масштаб позволяет дифференцировать отдельные частицы наполнителя. Однако установить наличие пространственных образований из частиц наполнителя проблематично из-за недостаточно высокого контраста (линейные программные методы повышения контраста неприменимы).

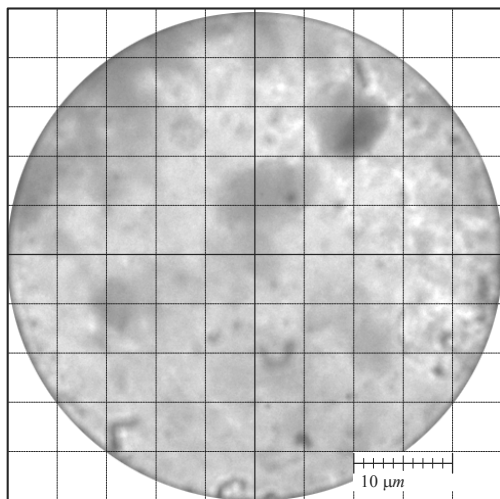


Рис. 1. Микрофотография наполненного связующего (отражённый свет), увеличение  $2000\times$

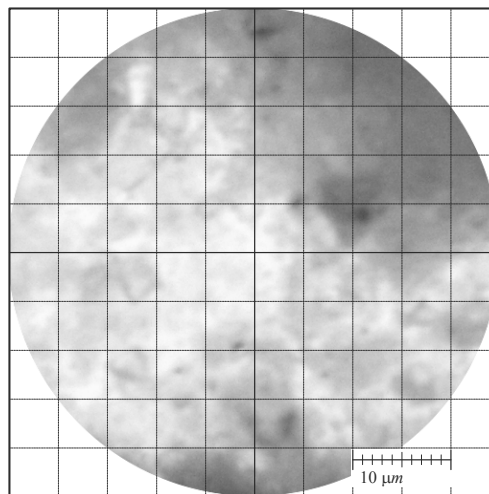


Рис. 2. Микрофотография наполненного связующего (отражённый свет), увеличение  $2000\times$

Наиболее информативными являются изображения, полученные в проходящем свете (рис. 3, 4). Микрофотографии тонких слоёв наполненного связующего обладают большим (по сравнению с рис. 1 и 2) контрастом. Отчетливо просматриваются структуры, которые можно классифицировать как кластеры из частиц наполнителя. Вследствие малой толщины исследуемого слоя связующего на конфигурации частиц наполнителя могут оказывать влияние активные центры на поверхности предметного и покровного стёкол. Уменьшить влияние последних можно увеличением толщины слоя. Однако при этом падает интенсивность проходящего через образец света и, как следствие, снижается контрастность изображения. Линейные методы контрастирования иногда могут использоваться в качестве средства постобработки изображения микроструктуры.

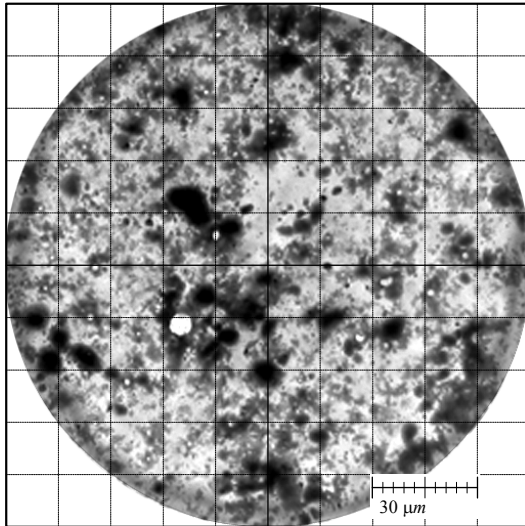


Рис.3. Микрофотография наполненного связующего (проходящий свет), увеличение  $800\times$

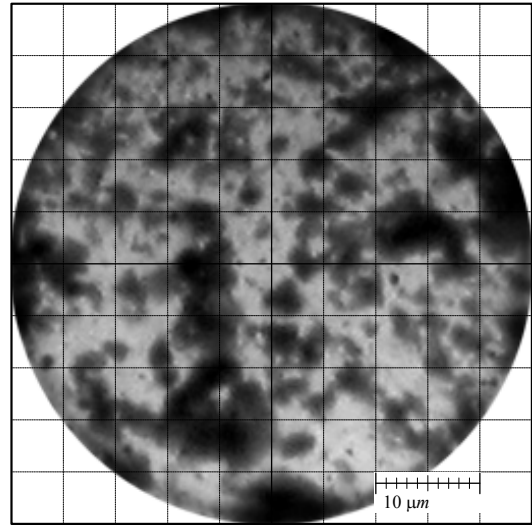


Рис.4. Микрофотография наполненного связующего (проходящий свет), увеличение  $2000\times$

При анализе микрофотографий применялось (поэлементное) нелинейное преобразование яркостного поля (рис. 5; использован интерпретатор с проблемно-ориентированного языка)

$$I_{Out} = f(I_m), f(t) = \begin{cases} 0, & t \notin [0,1] \\ \exp(-8(t - I_m)^2) & \end{cases} \quad (1)$$

( $f(t)$  – медианное значение интенсивности, полученное по гистограмме яркостного поля).

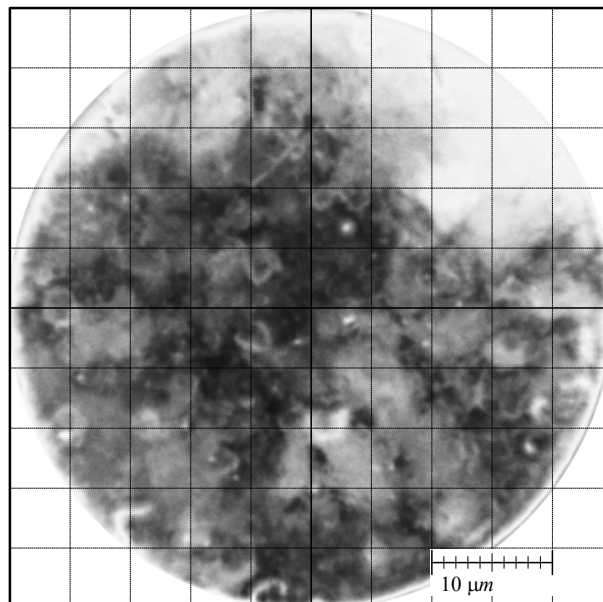


Рис.5. Микрофотография наполненного связующего (слой увеличенной толщины, проходящий свет), увеличение  $2400\times$

Как видим, при объемной степени наполнения  $v_f = 0,01$  пространственное распределение частиц аппретированного наполнителя не является равномерным. Структура наполненного связующего не однородна. Частицы наполнителя под влиянием



поверхностных сил (слагаемые потенциала парного взаимодействия) группируются в образования, которые можно классифицировать как кластеры.

Приведем далее результаты экспериментального исследования микроструктуры наполненного связующего методом атомной силовой микроскопии, лишенным этих недостатков. В частности, метод применялся при экспериментальном исследовании распределения частиц наполнителя в образце наполненного эпоксидного связующего (исходное растровое изображение микроструктуры наполненного ЭС на рис.6). Программное обеспечение сопровождения использованного микроскопа содержит средства обработки получаемых атомно-силовых сканов. Доступ к указанным средствам осуществляется посредством графического интерфейса пользователя. К сожалению, возможны затруднения при пакетной обработке серии АСМ-изображений. При постобработке изображений микроструктуры (см. рис. 6) использовалось ПО; результаты выравнивания – на рис.7.

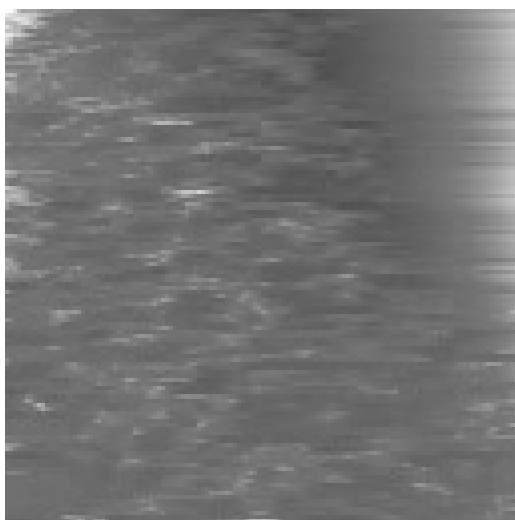


Рис.6. Необработанное растровое изображение микроструктуры наполненного ЭС, полученное методом АСМ

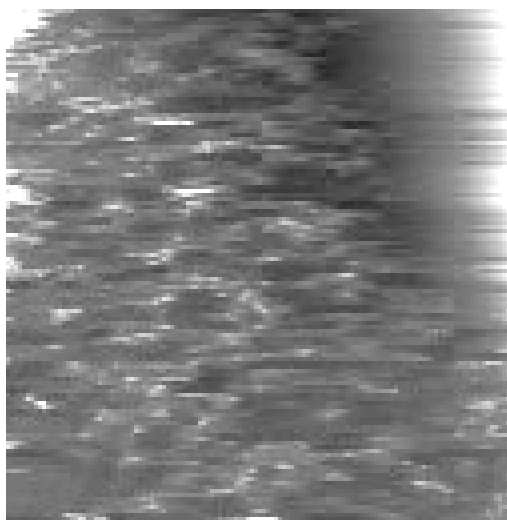


Рис.7. Выровненное изображение микроструктуры наполненного ЭС, полученное методом АСМ

При двух значениях объемной степени наполнения (0,33 и 0,01) с использованием алгоритмов постобработки была получена серия атомно-силовых изображений связующего на аппретированном наполнителе (рис.8–13). Как видим из рис. 8 и 9, при  $v_f = 0,33$  распределение частиц наполнителя в полимерной системе характеризуется высокой однородностью. Выбранный на рис.10, 11 масштаб фактически соответствует уже не микроструктуре наполненного связующего (удельная поверхность  $200 \text{ м}^2/\text{кг}$  при плотности  $5100 \text{ кг}/\text{м}^3$  даёт среднее значение радиуса частиц около 3 нм; пространственное разрешение составляет около 50 нм), а гетерогенной микроглобулярной структуре матричного материала (эпоксидного вяжущего). Размеры глобул матрицы близки к размерам частиц наполнителя (меньше размеров частиц в  $\approx 10$  раз). Это косвенно свидетельствует о рациональности выбора значения удельной поверхности наполнителя.

При уменьшении объёмной степени наполнения до  $v_f = 0,01$  возможно образование упорядоченных структур из частиц наполнителя (см. рис.12, 13; тёмные области соответствуют выступающим элементам структуры), отчётливо видны линейные кластеры из частиц наполнителя.

Для количественной оценки изображений требуются скалярные критерии соответствия. При определении критериев соответствия изображений микроструктуры учитывалось, что любой метод цифровой обработки включает три последовательных этапа:

1) дискретизация и квантование непрерывного яркостного поля исходного изображения;

2) выбор вычислительно-логических алгоритмов для преобразования дискретного изображения (возможна визуальная оценка промежуточных результатов или получение графических образов);

3) определение скалярных критериев оценки исходного изображения.

Аппаратные средства дискретизации и квантования, алгоритмы преобразований и вид скалярных критериев полностью определяют выбранный метод. Обработка исходного непрерывного цветояркостного поля средствами цифровой ЭВМ требует:

– построения матрицы, каждый элемент которой характеризует прямоугольную подобласть исходного изображения (дискретизация);

– перехода от непрерывно изменяющихся цветояркостных переменных к их дискретному представлению (квантование).

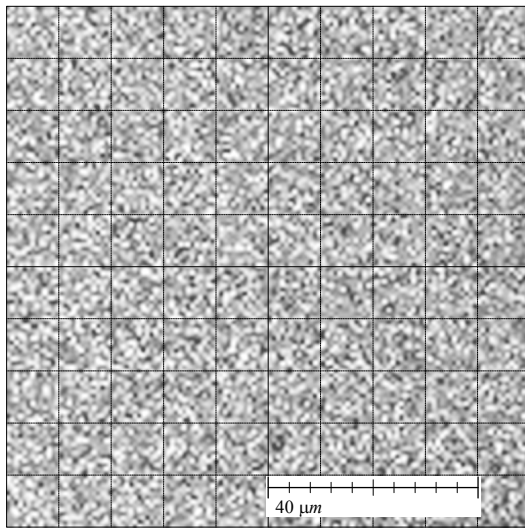


Рис.8. Микроструктура высоконаполненного ЭС, увеличение 600<sup>×</sup>

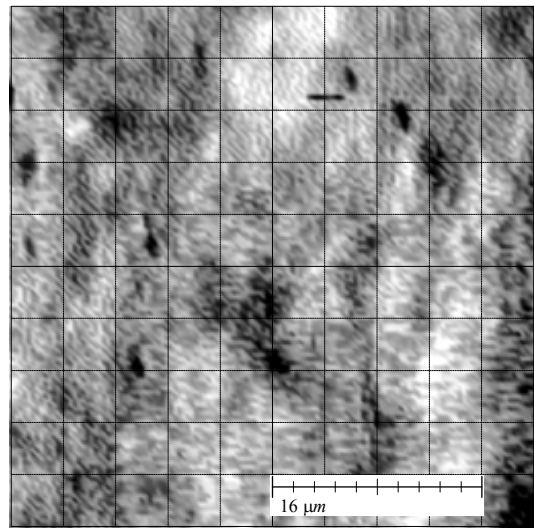


Рис.9. Микроструктура высоконаполненного ЭС, увеличение 1500<sup>×</sup>

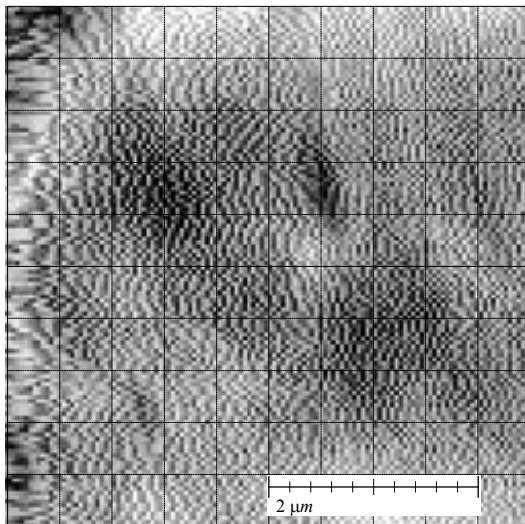


Рис.10. Микроструктура высоконаполненного ЭС, увеличение 12000<sup>×</sup>

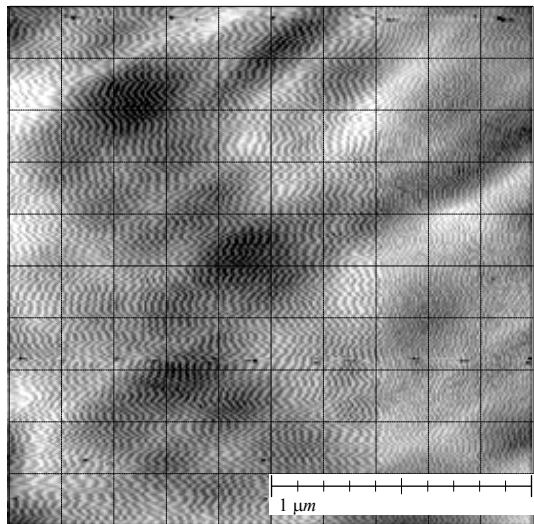


Рис.11. Микроструктура высоконаполненного ЭС, увеличение 25000<sup>×</sup>

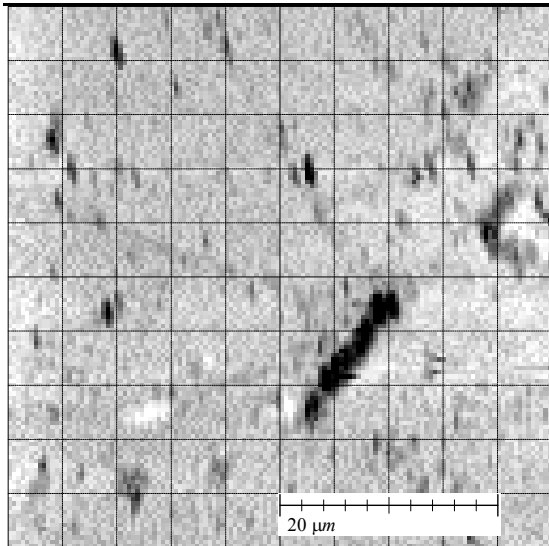


Рис.12. Микроструктура малонаполненного ЭС, увеличение 2000<sup>×</sup>

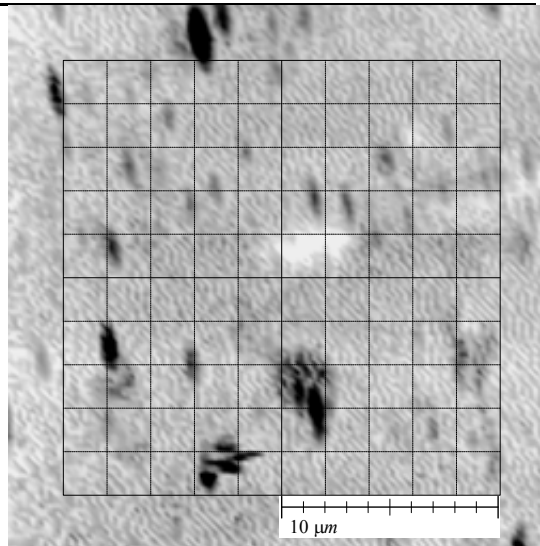


Рис.13. Микроструктура малонаполненного ЭС, увеличение 4000<sup>×</sup>

На практике указанные операции выполняются одновременно с помощью какого-либо приемного устройства, характеристики которого определяют объем информации, доступной для последующей программной обработки. Для метода оптической микроскопии устройством дискретизации и квантования является прибор с зарядовой связью; для АСМ таким устройством будет механическая система «образец – зонд», дополненная схемой измерения амплитуды колебаний зонда. После дискретизации и квантования исходное яркостное поле представляется двумерным массивом, а именно дискретной функцией

$$I[c, r], c = \overline{0, N-1}, r = \overline{0, M-1}, \quad (2)$$

двух дискретных пространственных аргументов ( $c, r$  – номера столбца и строки образа из  $M$  строк и  $N$  столбцов). Массив (2) можно рассматривать как выборку объема  $MN$  из генеральной совокупности, подчиненной одномерному распределению с неизвестной плотностью  $f(x)$ . Применяя к этой выборке методы описательной статистики, можно получить точечные оценки параметров распределения (математического ожидания и дисперсии):

$$\langle I \rangle = \frac{1}{MN} \sum_{r=0}^{M-1} \sum_{c=0}^{N-1} I[c, r], \quad (3)$$

$$s_I^2 = \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{r=0}^{M-1} \sum_{c=0}^{N-1} (I[c, r] - \langle I \rangle)^2}. \quad (4)$$

Использование моментов высших порядков нецелесообразно в силу их малой информативности. Пространственное распределение яркости координат *не оказывает влияния* на полученные оценки (3) и (4).

Известны различные способы количественного определения соответствия изображений в серии. Многие из них основаны на сопоставлении растровому образу некоторого скалярного параметра (интересующие исследователя характерные элементы изображения определяют способ вычисления). Удовлетворительные результаты можно получить с использованием *фрактальной размерности*. Строгое определение фрактальной размерности восходит к работам Г. Минковского и Ф. Хаусдорфа. Размерность Хаусдорфа может быть сравнительно просто вычислена только для самоподобных множеств – *фракталов* [1] (принадлежность объекта исследования к

которым априори неизвестна); в общем случае определение размерности Хаусдорфа весьма громоздко. Размерность Минковского для некоторого множества определяется как предел частного:

$$d_m = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N_\varepsilon}{\ln \varepsilon}, \quad (5)$$

где  $N_\varepsilon$  – минимальное число множеств с диаметром  $\varepsilon$ , которыми покрывается исходное множество.

Обычно используется соотношение (5). В частности, в [2] вместе с видоизменённым соотношением (5):

$$\ln N_\varepsilon = C - d_m \ln \varepsilon \quad (6)$$

приводится алгоритм нахождения фрактальной размерности. Он состоит в наложении на изображение последовательности сеток с ячейками размера  $\delta = 2^k$ ,  $k = \overline{0, K}$ ,  $K = \lfloor \log_2 L \rfloor$  (где  $L$  – размер изображения) и в эмпирическом нахождении зависимости

$$d(k) = -\frac{\ln N_k}{\ln \delta}, \quad (7)$$

где  $N_k$  – число ячеек сетки, полностью покрывающих все элементы растра (пиксели), яркость которых выше (или ниже) заранее заданного порога. Недостаток метода состоит в том, что найденное значение  $N_k$  не является минимальным числом ячеек, необходимым для покрытия.

Фрактальную размерность можно трактовать как среднее значение  $d(k)$  на некотором интервале:

$$\langle d_k \rangle = \frac{1}{K_k - 1} \sum_{n=1}^{K_k-1} (d(n+1) - d(n)) = d(K_1) - d(1). \quad (8)$$

При  $\delta = 2^{K_1}$  (размер единственной ячейки)  $d = 0$ ; значение фрактальной размерности  $d(K)$  всего изображения в соответствии с (8) равно фрактальной размерности последнего масштабного уровня (наименьший масштаб) изображения. Определение фрактальной размерности с учетом всех масштабных уровней возможно на основе линейной аппроксимации зависимости (6) методом наименьших квадратов [2].

Иногда фрактальная размерность определяется по монохромному растровому изображению объекта исследования. Метод состоит в наложении на изображение последовательности сеток и нахождении зависимости количества ячеек, занятых черными (белыми) пикселями, от размера ячейки. Аналогия между (7) и определением (5) очевидна. В то же время соотношение (7) можно записать в виде:

$$d(k) = -\frac{\ln N_k}{\ln \delta} = -\frac{\ln N_k}{\ln 2^k} = -\frac{1}{k} \log_2 N_k. \quad (9)$$

Если априори изображение – не «фрактальное»: число пикселей выше (ниже) порога не зависит от масштабного уровня, пропорционально квадрату отношения размера изображения к размеру ячейки сетки:

$$\alpha \left( \frac{L}{\delta} \right)^2 = \alpha \left( \frac{2^K}{2^k} \right)^2 = \alpha 2^{2(K-k)}, \quad \alpha \neq \alpha(\delta), \quad \alpha \in (0..1). \quad (10)$$

Пусть далее все «запороговые» пиксели находятся ниже прямой линии, проходящей через одну из вершин растрового образа. Тогда (при достаточно больших  $L$ ) минимальное число ячеек сетки, покрывающих пиксели, оказывается пропорциональным

числу пикселей:  $N_k = \gamma 2^{2(K-k)}$ ,  $\gamma = \gamma(\alpha)$ ,  $\gamma \neq \gamma(\delta)$ . Поэтому найденная по (7) фрактальная размерность будет:

$$\begin{aligned} d(k) &= -\frac{1}{k} \log_2 N_k = -\frac{1}{k} \log_2 (\gamma 2^{2(K-k)}) = \\ &= -\frac{1}{k} (\log_2 \gamma + 2(K-k)) = 2 \left(1 - \frac{K}{k}\right) - \beta, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\beta = \beta(k) = \frac{\log_2 \alpha}{k} \lim_{k \rightarrow \infty} \beta(k) = 0$ .

На первый взгляд, с учетом

$$\lim_{k \rightarrow \infty} d(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \left( 2 \left(1 - \frac{K}{k}\right) - \beta \right) = 2 \lim_{k \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{K}{k}\right) - \lim_{k \rightarrow \infty} \beta = 2$$

фрактальная размерность совпадает с топологической. При конечных значениях  $k$  найденное по (11) значение оказывается меньше двух (второе слагаемое под знаком первого предела отрицательно и отлично от нуля). Однако в последнем соотношении не учитывается, что предельный переход  $k \rightarrow \infty$  имеет смысл лишь при  $K \rightarrow \infty$ ,  $\frac{K}{k} \rightarrow 1$ . Поэтому действительное значение предела оказывается равным нулю; с точки зрения фрактальной геометрии этот результат лишён смысла.

Как видим, полученное несоответствие является следствием существенной важности в определении (5) предельного перехода при  $\varepsilon \rightarrow 0$ , в то время как в (7) такой переход совершить принципиально невозможно (существует вполне определённый нижний масштабный уровень, соответствующий  $\delta = 2^0 = 1$ ). По-видимому, метод анализа, в алгоритме которого предусмотрен лишь переход между уровнями (от уровня к уровню без изменения схемы подсчёта «запороговых» пикселей), не позволяет определить возможную дробную фрактальную размерность при анализе изображения. Предложенному методу (при всей его универсальности) присущ ещё один недостаток: наличие глобального порогового значения яркости, которое используется при переходе от полутонового изображения к монохромному. Непосредственно к анализу исходного полутонового изображения метод неприменим.

Предпочтительным является отказ от использования глобального порога; *видоизменённый алгоритм анализа должен фиксировать локальные различия яркостного поля*. Таким алгоритмом, в частности, является алгоритм двоичной декомпозиции изображения [3, 4]. Суть указанного алгоритма состоит в последовательном анализе изображения на различных масштабных уровнях. При переходе к каждому последующему уровню размер анализируемой области уменьшается в два раза. В алгоритме в качестве исследуемой области берется исходное изображение. Определяются минимальное и максимальное значения яркости в этой области. Если разность между максимальным и минимальным значениями не превышает заданного порогового значения (*порога разложения*), то область рассматривается как *лист* двоичного дерева (листу сопоставляются средние арифметические минимального и максимального значений яркости – т.н. *конечное значение яркости*). В противном случае исследуемая область делится на две подобласти (в зависимости от размеров – вертикальной или горизонтальной прямой), и алгоритм рекурсивно применяется (со второго шага) для каждой подобласти. Так, алгоритм имеет древовидную структуру данных. Листы представляют собой участки изображения, в пределах которых яркость сохраняет приблизительно постоянное значение. Для данного порога разложения глубина двоичного дерева и зависимость числа листов от уровня определяются пространственным распределением яркости. Поэтому набор двоичных декомпозиций, выполненных для различных порогов разложения, исчерпывающим образом характеризует пространственное распределение яркости.

Информативность полученного описания определяется использованием большого числа доступных зависимостей и скалярных параметров: характеристики общей однородности (глубина двоичного дерева и ее зависимость от порога разложения); зависимости числа листов (логарифм) от уровня дерева (устанавливает характерный масштаб, на котором возникает пространственная неоднородность); построенных для каждого уровня дерева и для каждого порога разложения вариационных рядов; характеристики, связывающей пространственный масштаб и доминирующее значение яркости (зависимость среднего по уровню конечного значения от глубины дерева).

Исходной дискретной функции (2) дерево двоичной декомпозиции ставит в соответствие две другие дискретные функции: функцию  $I_F[c, r]$ , совпадающую с конечным значением листа, покрывающего элемент в строке  $r$  и столбце  $c$ ; функцию  $l_F[c, r]$ , значение которой связано с глубиной листа, покрывающего элемент в строке  $r$  и столбце  $c$ . Графические образы этих функций (*матриц конечных значений и уровней*) являются визуальными представлениями двоичной декомпозиции. Анализ изображений связующего с использованием изложенного алгоритма и полученных методами оптической (см. рис.5) и сканирующей зондовой (см. рис.12) микроскопии показал, что матрицы конечных значений соответственно имеют вид, приведенный на рис. 14, 16 и 18; матрицы уровней – рис. 15, 17 и 19. Порог разложения при декомпозиции был принят равным  $0,1I_{\max}$  ( $I_{\max} = 1$  – максимальное значение яркости растрового образа на отрезке  $[0;1]$ ). При построении матриц уровней принималось:

$$V = 1 - e^{-\frac{d-d_{\max}}{2}}, \quad (12)$$

где  $d$  и  $d_{\max}$  – соответственно текущая и максимальная глубина дерева. Максимальной глубине листа дерева (наименьшему пространственному масштабу исходного изображения) соответствует нулевая яркость.

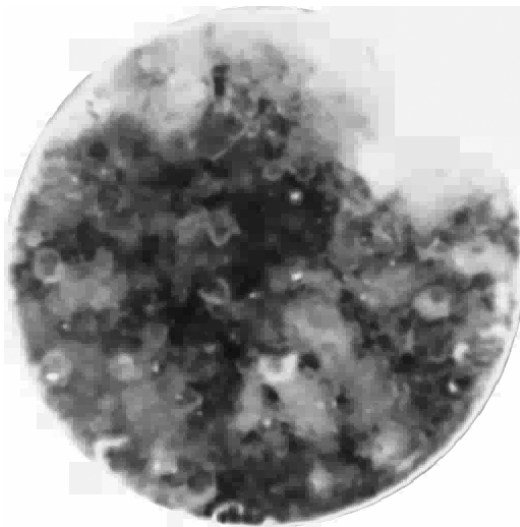


Рис.14. Матрица конечных значений изображения на рис. 5

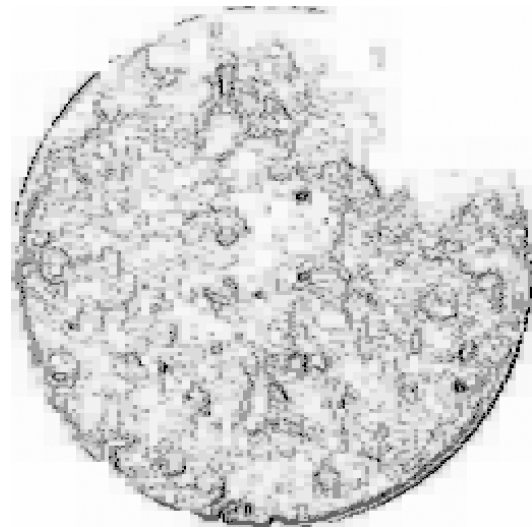


Рис.15. Матрица уровней изображения на рис. 5

Анализ матриц уровней позволяет выявить характерный масштаб, на котором проявляются неоднородности. Так, границе линейного кластера (правый верхний угол изображения на рис.12) соответствует темная линия на рис.17, покрываемая листами наибольшей глубины. Сравнительный визуальный *качественный* анализ показывает, что для изображений, образованных элементами сравнительно малых размеров, матрицы конечных значений в целом повторяют исходные изображения.



Рис.16. Матрица конечных значений изображения на рис. 12

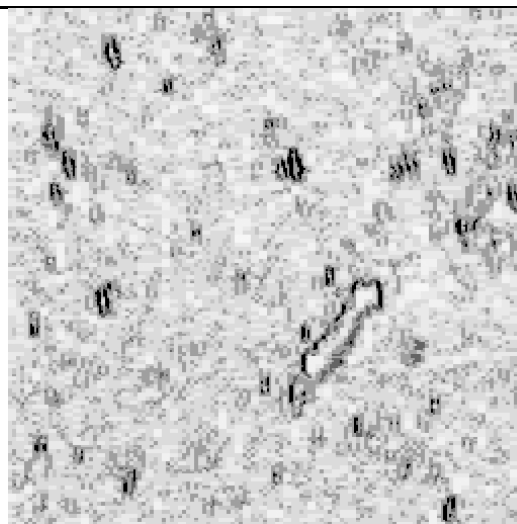


Рис.17. Матрица уровней изображения на рис. 12

Конечной целью древовидной декомпозиции является получение некоторого количественного критерия (*выражается одним числом*). Так, для каждого масштабного уровня деревьев двоичной декомпозиции в [3] использовались их заселённости:

$$P[l] = \frac{1}{\ln 2} \operatorname{arsh} N_l, \quad (13)$$

где  $N_l$  – число листов двоичного дерева на уровне  $l$ . Отметим, из (13) и (5) следует, что заселённость уровня можно трактовать как произведение фрактальной размерности на номер масштабного уровня. Действительно, с учётом  $\operatorname{arsh}(x) = \ln(x + \sqrt{1+x^2})$  при  $x \rightarrow +\infty$  имеем  $\operatorname{arsh}(x) \sim \ln(2x) = \ln 2 + \ln x$ ; поэтому при больших  $l$  (важно, что увеличение номера уровня  $l$  соответствует уменьшению масштаба, т.е. имеет место аналогия с предельным переходом в (5)):

$$P[l] = \frac{\operatorname{arsh} N_l}{\ln 2} \sim \frac{\ln 2 + \ln N_l}{\ln 2} = 1 + \frac{\ln N_l}{\ln 2}. \quad (14)$$

Откуда

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \frac{P[l]}{l} = \lim_{l \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{l} + \frac{\ln N_l}{l \ln 2} \right) \rightarrow - \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{\ln N_l}{\ln \frac{1}{2^l}} = \left| \frac{1}{\delta} = 2^l \right|_{\delta \rightarrow 0} = - \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_l}{\ln \delta}; \quad (15)$$

аналогия с определением размерности по Минковскому очевидна.

Таким образом, частное  $d_l[l] = P[l]/l$  от деления заселённости на номер уровня имеет смысл фрактальной размерности. Зависимости  $d_l[l]$  приводятся на рис.18, 19 (соответственно для изображений на рис. 5, 12).

Для эмпирических изображений микроструктуры средние значения фрактальной размерности равны: 1,63 – при оптической микроскопии, 1,76 – при сканирующей зондовой микроскопии; 1,72 – для изображения микроструктуры, полученного моделированием динамики структурных элементов (свидетельствует об адекватности математических моделей). Двоичная декомпозиция характеризует распределение элементов изображения на различных масштабных уровнях, является более информативной по сравнению с точечными оценками моментов или вариационным рядом.

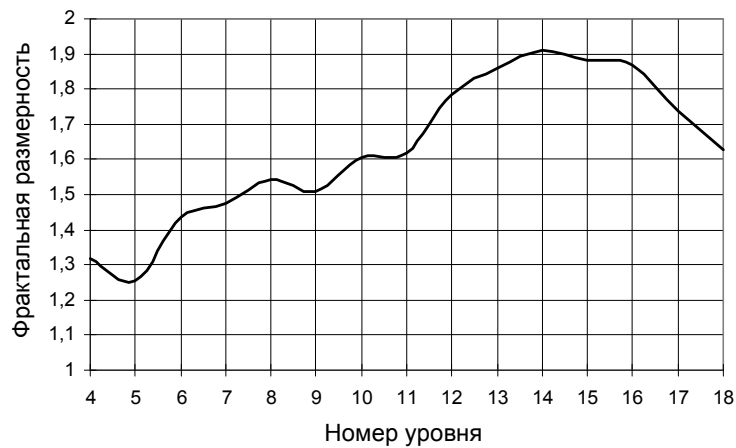


Рис.18. Зависимость фрактальной размерности от номера уровня для изображения на рис. 5

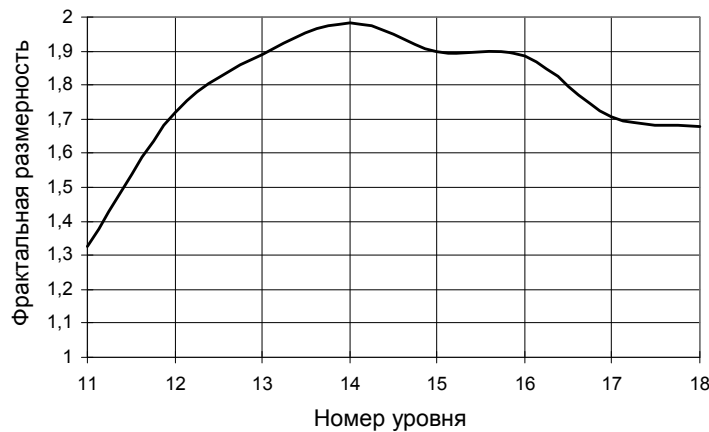


Рис.19. Зависимость фрактальной размерности от номера уровня для изображения на рис. 12

### ВЫВОДЫ

1. Микрофотографии эпоксидного связующего позволяют анализировать взаимное расположение частиц наполнителя. Наиболее информативными при анализе методом оптической микроскопии являются изображения тонких слоёв наполненного связующего в проходящем свете.

2. Из визуального анализа микрофотографий следует, что при объемной степени наполнения  $v_f = 0,01$  пространственное распределение частиц аппретированного наполнителя не равномерное; структура наполненного связующего не однородная (частицы наполнителя под влиянием поверхностных сил группируются в образования, которые можно классифицировать как кластеры).

3. Из анализа изображений, полученных методом АСМ, следует, что при  $v_f = 0,33$  распределение частиц наполнителя в полимерной системе характеризуется высокой однородностью. При  $v_f = 0,01$  в наполненном связующем образуются упорядоченные структуры из частиц наполнителя (линейные и глобулярные кластеры).

4. Средние значения фрактальной размерности для эмпирических изображений микроструктуры составляют 1,63 (оптическая микроскопия) и 1,76 (сканирующая зондовая микроскопия).



## Список литературы

1. Mandelbrot, B. The Fractal Geometry of Nature / Benoit B. Mandelbrot. – San Francisco: W.H. Freeman, 1982. – 460 p.
2. Crowover, R. Introduction to Fractals and Chaos / Richard M. Crowover. – Boston-London: Jones & Bartlett Publishers, 1995. – 306 p.
3. Danilov, A.M. Quality estimation using binary image decomposition trees: application for analysis of decorative coatings / A.M. Danilov, V.I. Loganina, V.A. Smirnov // Архитектура и строительство. Наука и образование как фактор оптимизации среды жизнедеятельности: материалы Междунар. науч.-практ. конф.-семинара (11...16 октября 2004 г.). – Хаммамет, Тунис. – С. 192–196.
4. Данилов, А.М. Двоичная декомпозиция изображения как средство оценки цифровой фильтрации в специальных задачах / А.М. Данилов, А.П. Прошин, В.А. Смирнов // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. – М.: Академия наук о Земле, 2005. – Т. 3. – С. 30–31.

## References

1. Mandelbrot, B. The Fractal Geometry of Nature / Benoit B. Mandelbrot. – San Francisco: W.H. Freeman, 1982. – 460 p.
2. Crowover, R. Introduction to Fractals and Chaos / Richard M. Crowover. – Boston-London: Jones & Bartlett Publishers, 1995. – 306 p.
3. Danilov, A.M. Quality estimation using binary image decomposition trees: application for analysis of decorative coatings / A.M. Danilov, V.I. Loganina, V.A. Smirnov // Architecture and construction. Science and education as a factor in optimizing the living environment: proceedings of the international scientific-practical conference-seminar (11...16 October, 2004). – Hammamet, Tunisia. – P. 192–196.
4. Danilov, A.M. Binary decomposition of the image as a measure of digital filtering for special problems / A.M. Danilov, A.P. Proshin, V.A. Smirnov // Proceedings of the International Forum on Science, Technology and Education. – M.: Academy of Sciences of the Earth, 2005. – Vol. 3. – P. 30–31.

УДК 666.972.16

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**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

**Горшков Валентин Иванович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

**Belyakova Elena Aleksandrovna**,  
Senior lecture of the department «Real estate  
cadastre and right»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

**Gorshkov Valentin Ivanovich**,  
Candidate of Science, Associate Professor  
of the department «Heat, gas supply and  
ventilation»

## ПРОТИВОМОРОЗНЫЕ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ, МИНЕРАЛЬНЫХ И УСКОРЯЮЩИХ МОДИФИКАТОРОВ

О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, В.И. Горшков

Проанализирован характер влияния основных компонентов комплексных противоморозных добавок на технологические свойства цементно-минеральных смесей, состав продуктов гидратации и формирование микроструктуры цементного камня. Разработаны основные принципы проектирования комплексных противоморозных добавок.

*Ключевые слова: противоморозные добавки, суперпластификаторы, ускорители твердения, минеральные модификаторы, структура цементного камня, прочность.*

## ANTIFREEZE ADDITIVES BASED ON SUPERPLASTICIZERS, MINERAL AND ACCELERATING MODIFIERS

O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, V.I. Gorshkov

The authors give an analysis of the main components of complex antifreeze additives influence on the technological properties of cement-mineral mixtures, the composition of hydration products and the formation of the microstructure of cement paste. Basic principles of designing complex antifreeze additives were developed.

*Keywords: antifreeze additives, superplasticizers, accelerators of hardening, mineral modifiers, cement stone structure, strength.*

С ростом объемов монолитного строительства и внедрением передовых технологий значительно возрастают требования к качеству и долговечности строительных конструкций, зданий и сооружений, технологиям приготовления, укладки и ухода за бетоном, определяющим в итоге основные физико-механические свойства железобетонных конструкций.

Одним из наиболее распространенных способов повышения эффективности зимнего бетонирования является применение противоморозных добавок, понижающих температуру замерзания жидкой фазы бетонной смеси, обеспечивая тем самым возможность твердения бетона на морозе. Другим способом повышения эффективности

зимнего бетонирования является применение водопонижающих и минеральных добавок.

В технологии бетонов при зимнем бетонировании в качестве минеральных добавок широкое распространение получили микрокремнеземы и некоторые другие модификаторы, а в качестве ускорителей твердения и противоморозных добавок наибольшей популярностью пользуются безхлоридные ускорители, не вызывающие коррозии стальной арматуры в железобетонных конструкциях. Несмотря на то, что в технологии зимнего бетонирования используется большое количество индивидуальных и комплексных модификаторов, влияние многих из них на технологические свойства и формирование структуры цементного камня еще недостаточно исследовано; в частности, это касается органоминеральных комплексов и некоторых ускорителей твердения.

При проектировании комплексных противоморозных добавок важной является оценка их влияния не только на реологические параметры цементных систем, но также на формирование структуры цементного камня и состав продуктов гидратации, определяющих основные физико-механические свойства бетона.

Исходя из вышесказанного, задачей исследований являлось изучение влияния отдельных компонентов комплексных добавок на формирование микроструктуры цементного камня, а также оценка пластифицирующего действия добавок в цементных и цементно-минеральных смесях.

На первом этапе была выполнена серия экспериментов по оценке реологической эффективности суперпластификаторов С-3 и Melflux 1641 F в цементных и минеральных системах.

Исследования проводились с использованием портландцемента ЦЕМ I 42,5Б и гранитной каменной муки с  $S_{уд} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Содержание суперпластификаторов составляло от 0,25 до 1 % от массы цемента или минеральных компонентов. Исходные пасты готовили с постоянным водотвердым отношением, равным 0,4. Пластичность оценивалась по расплыву суспензий, определяемому с помощью микровискозиметра Суттарда. Результаты представлены в табл. 1.

Наибольший пластифицирующий эффект как для цемента, так и для гранитной каменной муки отмечается при использовании добавки Melflux 1641, и высокая эффективность гиперпластификатора наблюдается уже при дозировке 0,25 % и выше.

При использовании добавки С-3 в каменной муке высокая эффективность достигается уже при малых дозировках (до 0,5 %) и сохраняется при повышенных. Для цементных суспензий пластифицирующий эффект при малых количествах добавки незначителен и возрастает с увеличением дозировки С-3.

Высокая эффективность суперпластификаторов для минеральных суспензий на основе гранитной каменной муки позволяет использовать цементно-минеральные смеси (при количестве минерального компонента до 100 % и более от массы цемента) в бетонах с содержанием цемента  $200\text{--}300 \text{ кг}/\text{м}^3$  как реологически активную матрицу и с целью повышения водоредуцирующего эффекта за счёт минеральной добавки.

Т а б л и ц а 1

Влияние суперпластификаторов  
на пластичность цементных и минеральных суспензий при В/Т=0,4

Дозировка СП и ГП, %	Расплывы суспензий из минивискозиметра, мм			
	Портландцемент Мордовский ПЦ500 Д0		Гранитная каменная мука, $S_{уд}=4500 \text{ см}^2/\text{г}$	
	С-3	Melflux 1641F	С-3	Melflux 1641F
0	29	29	30	30
0,25	33	63	68	69
0,5	56	70	73	68
0,75	59	73	71	68
1,0	67	80	66	69

Каменная мука, не являясь в отличие от цемента гидратационной системой, будет в большей степени разжижаться в водной суспензии в присутствии СП и ГП, и при добавлении ее в цементную матрицу соответственно будет способствовать большей пластификации, снижению В/Т и улучшению основных физико-механических свойств цементных материалов.

Основной целью применения каменной муки в составе цементно-минеральных суспензий является повышение реологической активности системы и эффективности действия пластификаторов и суперпластификаторов. Задача заключается в поиске оптимальных соотношений между цементом, каменной мукой, количеством и видом СП (ГП), способных обеспечивать получение высоких водоредуцирующих эффектов.

Кроме гранитной каменной муки, были выполнены исследования с использованием других тонкомолотых минеральных наполнителей: песчаника, диатомита, опоки, микрокварца ( $S_{уд}=460-480 \text{ м}^2/\text{кг}$ ).

По эффективности разжижающего влияния суперпластификаторов Melflux 1641 и С-3 минеральные добавки можно расположить в последовательности «гранитная каменная мука > песчаник > опока, микрокварц > диатомит». Таким образом, наибольшему пластифицирующему влиянию подвержена гранитная каменная мука, а наименьшему (в значительно меньшей степени, чем цемент) – молотый диатомит.

Важным фактором при назначении вида и дозировок противоморозных компонентов комплексных добавок является оценка их влияния на формирование кристаллизационных структур цементного камня, во многом определяющих кинетику начального структурообразования и роста прочности, что чрезвычайно важно в технологии зимнего бетонирования. Известно [1, 2], что противоморозные компоненты комплексных добавок, такие, как хлористые соли, нитраты и нитриты натрия и кальция, ацетаты и формиаты натрия и кальция, при твердении на морозе не приводят к принципиальному изменению состава гидратных фаз по сравнению с таковыми при нормальном твердении и способствуют повышению плотности и снижению пористости цементных материалов вследствие активации образования и повышения дисперсности гидратных фаз, способствующих повышению прочности и морозостойкости цементных бетонов.

На основании рентгенофазовых исследований выполнен анализ влияния некоторых наиболее распространенных противоморозных добавок на состав продуктов гидратации и прочность мономинеральных вяжущих веществ, входящих в состав традиционных портландцементов, а также на цементных вяжущих. Исследования проводились на образцах  $C_3S$  и  $C_4AF$ , твердевших в нормальных условиях в присутствии добавок нитрита натрия, нитрата кальция, а также ацетатов натрия и кальция и некоторых хлористых солей. Рентгенофазовые исследования проводили параллельно с анализом кинетики твердения вяжущих веществ.

Характер влияния добавок-электролитов на процессы твердения цементных систем полифункционален и зависит от дозировки добавки, вида катиона и аниона, температуры твердения и т.д. При малом количестве добавок (1–2 % от массы вяжущих) для большинства цементов отмечается ускорение твердения и повышение прочности образцов. Однако при увеличении их содержания до 4–6 % резкого ускорения, как правило, не происходит, а в отдельных случаях наблюдается снижение прочности в ранние сроки, особенно при твердении в нормальных условиях.

При твердении в условиях отрицательных температур негативное влияние повышенных дозировок большинства добавок вследствие увеличения молярности раствора и понижения температуры замерзания жидкой фазы проявляется значительно меньше.

Рентгенофазовый анализ и исследование кинетики и твердения  $C_3S$  свидетельствует о том, что механизм повышения прочности  $C_3S$  в присутствии ускорителей твердения связан с активацией процессов образования гидросиликатов кальция (ГСК) различной кристаллохимической структуры и свойств и изменения соотношения между ГСК,  $Ca(OH)_2$ ,  $(CH)$  и гидроалюминатами кальция в твердеющей системе. Увеличение степени закристаллизованности гидратов в присутствии добавок,

гранулометрическая неоднородность и разность плотностей гидратных фаз в целом приводят к повышению прочности  $C_3S$ .

При сравнении рентгенограмм  $C_3S$  с добавками  $NaNO_2$  и  $Ca(NO_3)_2$  отмечается значительное увеличение интенсивности линий СН и тоберморитового геля. Для состава с нитритом натрия, так же, как и с хлоридом натрия, наиболее характерным является увеличение интенсивности линий тоберморитового геля как по абсолютной величине, так и относительно наиболее стабильной фазы (СН). Соли натрия в большей степени способствуют формированию и кристаллизации тоберморитового геля в отличие от солей кальция, для которых характерно увеличение не только количества ГСК, но и извести, что свидетельствует об увеличении степени гидратации  $C_3S$  в присутствии кальциевых солей. По эффективности действия как ускорителей твердения добавки  $NaNO_2$  и  $Ca(NO_3)_2$  близки, а добавки ацетатов натрия и кальция в большей степени повышают прочность  $C_3S$  в ранние сроки, что позволяет сделать вывод о целесообразности их применения в составе комплексных противоморозных смесей.

Для определения влияния добавок-ускорителей твердения на состав продуктов гидратации алюминатных фаз цемента проводились рентгенофазовые исследования образцов  $C_4AF$  со сроком твердения 60 сут. Проведение исследований процессов гидратации и твердения  $C_4AF$  с добавками-ускорителями обусловлено тем, что, во-первых, содержание этой фазы в цементном клинкере значительно превосходит содержание  $C_3A$ , а во-вторых, присутствие в ней окислов железа отражается на общем характере протекания процессов кристаллизации и перекристаллизации гидроалюминатов кальция и, в конечном счете, на прочности цементного камня.

Прочность твердеющих алюминатных структур достаточно чутко реагирует на применение различных добавок, и характер её изменения является результатом, отражающим протекание конструктивных (кристаллизационных) и деструктивных (перекристаллизационных) процессов. Несмотря на значительное повышение количества образующихся метастабильных гидроалюминатов кальция в присутствии добавок, последующая перекристаллизация может значительно снизить начальную прочность, поскольку при изменении плотности, а также формы кристаллов, например, с гексагональной на кубическую снижается прочность первоначально сформированного пространственного каркаса.

Рентгенофазовые исследования показали, что основным фактором, определяющим повышение прочности алюминатных структур в присутствии электролитов, в ранние сроки является увеличение количества гидратов АFm-фаз и  $CAH_{10}$  в системе и их стабилизация в последующий период твердения. Образование пространственного коагуляционного каркаса из тонкодисперсных кристаллов АFm-фазы является одной из причин загустевания цементных смесей и повышения ранней прочности образцов  $C_4AF$ .

В технологии бетона добавки, содержащие ацетаты и формиаты щелочных и щелочноземельных металлов, получили широкие распространения не только как ускоряющие, но и как противоморозные [1]. Интерес к подобным модификаторам обусловлен, в первую очередь, тем, что они не вызывают коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций. Исследования, выполненные в данной работе, показали высокую эффективность ацетатов кальция и натрия как ускорителей твердения не только силикатных, но и алюминатных фаз и цементных композиций. Анализ фазового состава  $C_4AF$ , гидратированного с добавкой ацетата натрия, показал, что по характеру влияния на состав продуктов гидратации ацетат натрия близок к хлористым солям, однако является несомненно более предпочтительным с точки зрения степени коррозии арматуры. Несколько большее количество извести, образующееся при гидратации как  $C_3S$ , так и  $C_4AF$ , позволяет рекомендовать использование добавок на основе ацетата натрия совместно с микрокремнеземом, позволяющим эффективно связывать известь в гидросиликаты кальция.

Продукты гидратации  $C_4AF$  с добавкой  $NaNO_2$  на рентгенограммах представлены отражениями, характерными для  $C_3AH_6$ , интенсивность которых выше, чем в контрольном составе, но ниже, чем в составах с добавками хлористых солей. Интенсивность линий  $CAH_{10}$  также выше, чем в контрольном составе, а интенсивности

отражений  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  примерно равны. Очевидно, что одним из возможных механизмов повышения прочности  $\text{C}_4\text{AF}$  в поздние сроки (60 сут) является образование фазы  $\text{CAH}_{10}$ , кристаллы которой имеют форму гексагональных призм, упрочняющих гидрo-алюминатную структуру.

В ранние сроки (3–7 сут) прочность образцов с добавкой  $\text{NaNO}_2$  ниже контрольного, а в более поздние сроки (28–60 сут) – выше. Это свидетельствует в том, что в присутствии нитрита натрия процесс перекристаллизации гидратов  $\text{AFm}$ -фаз в  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , связанный с разуплотнением структуры, протекает в ранние сроки более умеренно, без сопровождения резкими перепадами прочности. В составе же без добавки этот процесс протекает скачкообразно и начинает активизироваться лишь в период 14–28 сут. Прочностные показатели образцов с добавкой  $\text{NaNO}_2$  в период твердения до 28 сут близки к составам с добавкой хлоридов ( $\text{KCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ). В целом добавка  $\text{NaNO}_2$  по эффективности и характеру влияния на фазовый состав продуктов гидратации близка к добавкам хлористых солей (особенно  $\text{KCl}$ ) и ацетату натрия.

Прочность образцов  $\text{C}_4\text{AF}$  с добавкой ацетата натрия в начальные сроки близка к прочности контрольных образцов и в период твердения до 28 сут не наблюдается её резкого снижения, в отличие от контрольного состава, для которого характерным является снижение прочности к 28-м суткам. По поводу применения нитрита и ацетата натрия в качестве противоморозных добавок следует отметить, что они в период твердения до 60 сут не повышают (или повышают незначительно) прочность  $\text{C}_4\text{AF}$ . Положительным фактором является то, что в их присутствии не наблюдается резких изменений прочности, которые характерны для образцов  $\text{C}_4\text{AF}$ , гидратированных без добавок.

Влияние добавки  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  существенно отличается от рассмотренных выше не только по фазовому составу гидратов, но и по кинетике твердения. Во-первых, следует отметить, что прочность образцов  $\text{C}_4\text{AF}$  в возрасте 7 сут более чем в 2 раза превышает прочность контрольных образцов, а также составов с хлоридами. Одной из основных причин, объясняющих подобное поведение системы, является активация образования гидратов  $\text{AFm}$ -фаз, снижение скорости перекристаллизации гидроалюминатов кальция, а также количества и степени закристаллизованности  $\text{C}_3\text{AH}_6$ . Это подтверждается весьма существенным снижением интенсивности линий, отнесенных к этой фазе. Возможно, что ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{NO}_3^{2-}$  оказывают влияние не только на процессы стабилизации гидратов  $\text{AFm}$ -фаз, но и на скорость растворения и гидролиза исходного вяжущего. В то же время снижение прочностных показателей  $\text{C}_4\text{AF}$  с добавкой  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  в период до 28 сут свидетельствует о протекании процессов перекристаллизации и возникновении внутренних напряжений в системе. В целом прочность образцов в возрасте 28 сут и более остается достаточно высокой. Из этого следует весьма важный практический вывод о том, что добавка  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  для цементов с повышенным содержанием алюминатных фаз будет более эффективна, чем другие ускорители твердения, особенно при использовании её в качестве компонента в комплексных противоморозных добавках. Повышение прочности  $\text{C}_4\text{AF}$  с добавкой  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , очевидно, может быть объяснено не столько образованием и стабилизацией фазы  $\text{CAH}_{10}$  (интенсивность линий  $\text{CAH}_{10}$  меньше, чем в составах с хлоридами, хотя и выше, чем в контрольном), сколько стабилизацией гидратов  $\text{AFm}$ -фаз снижением количества и степени закристаллизованности фазы  $\text{C}_3\text{AH}_6$ . Кроме того, определенный вклад в формирование кристаллизационного каркаса может вносить гидронитроалюминат кальция, образующийся в присутствии добавки  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ .

Анализ прочностных показателей и кинетики водопоглощения  $\text{C}_4\text{AF}$  свидетельствует, что в присутствии нитрата кальция формируется плотная и прочная структура гидроалюминатов кальция, в которой в меньшей степени, чем с добавками хлористых солей, нитрита и ацетата натрия, протекают процессы перекристаллизации метастабильных гидроалюминатов кальция в  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , вследствие чего формируется более плотная и менее дефектная структура. Увеличение интенсивности линий  $\text{CH}$  в области средних углов и снижение интенсивности линий  $\text{C}_3\text{AH}_6$  в присутствии нитрата кальция, в отличие от добавок, указанных выше, свидетельствует о том, что значительная

часть ионов  $\text{Ca}^{2+}$  переходит в структуру СН, поэтому в цементном камне с добавкой  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  устойчивость одной из наиболее стабильных гидратных фаз – этtringита – будет повышаться.

По характеру влияния на кинетику изменения прочности  $\text{C}_4\text{AF}$  добавка ацетата кальция близка к нитрату кальция. Однако несмотря на то, что прочность образцов с добавкой ацетата кальция ниже, чем прочность образцов с добавкой  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , в присутствии ацетата кальция не наблюдается резких перепадов прочности в период до 60 сут.

На основании выполненных исследований установлено, что по характеру влияния на прочность и формирование микроструктуры алюминатных фаз цемента добавки нитрата и ацетата кальция являются более предпочтительными, чем добавки нитрита и ацетата натрия.

Таким образом, для получения высокотехнологичных бетонных смесей и высококачественных бетонов для зимнего бетонирования необходимо выполнение трех основных условий:

1) обеспечение высокой эффективности суперпластификаторов за счёт использования минеральных тонкомолотых добавок, полученных на основе плотных горных пород. В свою очередь, снижение В/Т позволит получать более плотные и прочные структуры в отличие от составов без минеральных добавок;

2) определение вида используемой минеральной добавки, которая позволила бы сочетать в себе наряду с высокой реологической активностью ещё и гидравлическую активность. Наиболее перспективными в этом плане являются тонкомолотые минеральные добавки, в состав которых входят кремнийсодержащие породы, которые при оптимальной дисперсности способны связывать в гидратирующейся цементной системе свободную известь в гидросиликатные структуры. Минеральные добавки позволяют не только создавать стеснённые условия в цементной системе и при правильно подобранном гранулометрическом составе заполнять пустоты между более крупными частицами, но и на следующем этапе за счёт гидравлической активности и формирования на поверхности цементных и минеральных частиц зон активного взаимодействия и формирования контактно-кристаллизационной структуры твердения повышать прочность материала. Количество минеральных компонентов может составлять от 50 до 100 % от массы цемента в зависимости от его расхода на  $1 \text{ м}^3$  бетона;

3) выбор оптимального и эффективного противоморозного компонента, который должен вводиться отдельно от пластифицирующей добавки в зависимости от ожидаемой температуры наружного воздуха при бетонировании.

При выполнении этих условий возможно получение высокотехнологичных бетонных смесей и бетонов оптимальной структуры, способных при неблагоприятных климатических и производственных условиях обеспечивать быстрые темпы твердения и высокие эксплуатационные качества монолитных конструкций.

#### Список литературы

1. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
2. Тараканов, О.В. Цементные материалы с ускоряющимися и противоморозными добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза: ПГУАС, 2003. – 422 с.

#### References

1. Ratinov, V.B. Concrete admixtures / V.B. Ratinov, T.I. Rozenberg. – M.: Stroyizdat, 1989. – 188 p.
2. Tarakanov, O.V. Cementitious materials with accelerating and antifreeze admixtures based on recycled materials / O.V. Tarakanov. – Penza: PGUAS, 2003. – 422 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

**Логанина Валентина Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Управление качеством и  
технологии строительного производства»  
E-mail: loganin@mai.ru

**Жегера Кристина Владимировна**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технологии строительного производства»  
E-mail: jegera@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

**Loganina Valentina Ivanovna**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Quality management and  
construction technologies»  
E-mail: loganin@mai.ru

**Zhegera Christina Vladimirovna**,  
Postgraduate of the department «Quality  
management and construction technologies»  
E-mail: jegera@yandex.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ АЛЮМОСИЛИКАТОВ В РЕЦЕПТУРЕ ПЛИТОЧНОГО КЛЕЯ\*

В.И. Логанина, К.В. Жегера

Приведены сведения о влиянии синтезированных алюмосиликатов на структуру и свойства плиточного клея на основе цемента. Показана водоудерживающая способность алюмосиликатов. Приведены сведения о кинетике удаления влаги из цементных композитов.

*Ключевые слова: плиточный клей, синтезированные алюмосиликаты, структура, прочность, водоудерживающая способность.*

## APPLICATION OF SYNTHESIZED ALUMINOSILICATE IN TILE ADHESIVE FORMULATIONS

V.I. Loganina, Ch.V. Zhegera

Information on the impact of synthesized aluminosilicates on structure and properties of tile adhesive based on cement is provided. Water-holding capacity of aluminosilicates is shown. Information on kinetics of moisture removal from the cementitious composites is given.

*Keywords: tile adhesive, synthetic aluminosilicates, structure, strength, water-holding capacity.*

В настоящее время отечественный рынок сухих смесей является одним из наиболее динамично развивающихся сегментов отрасли строительных материалов. Длительный срок службы покрытий на основе сухих строительных смесей (ССС) является одним из главных факторов, который обеспечивает низкие эксплуатационные расходы на содержание зданий.

Повышение эксплуатационных свойств строительных материалов, в том числе и покрытий на основе СССР, может быть обеспечено путём введения в их рецептуру нанодисперсных добавок, способных регулировать структурообразование материала [1, 2, 3].

Проведенные ранее исследования подтвердили эффективность введения в рецептуру отделочных известковых СССР нанодисперсных добавок – синтезированных

\* Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части.



гидросиликатов кальция (ГСК), золя кремниевой кислоты, органоминеральных добавок, способствующих повышению стойкости известковых покрытий [4, 5, 6].

В продолжение дальнейших исследований нами предложено для регулирования структурообразования цементных композиций вводить в рецептуру синтезированные алюмосиликаты. Технология синтеза заключалась в осаждении алюмосиликатов из натриевого жидкого стекла сульфатом алюминия  $Al_2(SO_4)_3$  [7].

Химический и фазовый состав синтезируемого продукта определялся на рентгеновской станции ARL 9900 X-ray WorkStation (Thermo Scientific) на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. При оценке химического состава синтезированных алюмосиликатов установлено, что преобладают оксиды кремнезема, составляющие 55,45 %.

Рентгенофазовый анализ выявил наличие кристаллической фазы (22 %), представленной тенардитом и гиббситом, а также аморфной составляющей, представленной агрегатами наноразмерных кристобалитоподобных кристаллитов (78 %).

Установлено, что синтезированные алюмосиликаты характеризуются высокой активностью, составляющей более 350 мг/г. Удельная поверхность порошка, определенная методом БЭТ, составляет  $S_{уд} = 86,5 \pm 3,5$  м<sup>2</sup>/г.

Нами установлена возможность применения синтезированных алюмосиликатов в цементных системах. Для проведения исследований в работе применялся Вольский портландцемент марки 400. Оценивалось влияние добавок на изменение сроков схватывания цемента. Результаты исследований приведены в таблице.

Т а б л и ц а

Изменение нормальной густоты и сроков схватывания цементного теста в зависимости от содержания добавки

Содержание добавки, %, от массы цемента	Нормальная густота цементного теста НГЦТ, %	Сроки схватывания	
		Начало схватывания	Конец схватывания
-	28	2 ч 30 мин	5 ч
10	34	50 мин	1 ч 40 мин
20	41	40 мин	1 ч 30 мин
30	43	20 мин	1 ч 15 мин

Анализ данных свидетельствует, что композиционное цементное вяжущее, содержащее синтезированные алюмосиликаты, имеет более высокое значение нормальной густоты цементного теста, составляющее 34-43 % в зависимости от содержания добавки. Наблюдается ускорение сроков схватывания. Так, у цементного теста без добавки начало и конец схватывания составляют соответственно 2 ч 30 мин и 5 ч, а у композиционного вяжущего, содержащего 20 % алюмосиликатов, – 40 мин и 1 ч 30 мин. С увеличением содержания алюмосиликатов в композиционном вяжущем сроки схватывания ускоряются.

Синтезированные алюмосиликаты предложено использовать в рецептуре плиточного клея. Установлено, что алюмосиликаты обладают влагоудерживающей способностью, что создает более благоприятные условия для твердения цемента. На рис. 1, 2 приведена кинетика высыхания цементных образцов при твердении в воздушно-сухих условиях. Образцы изготавливались с водоцементным отношением В/Ц, равным В/Ц=0,43. Для сравнения были применены добавки метилцеллюлозы марки FMC 2094 и Vermokool 425.

Установлено, что наибольшей влагоудерживающей способностью обладают синтезированные алюмосиликаты. Так, в возрасте 20 суток воздушно-сухого твердения влагосодержание контрольных образцов составляло 0,32 %, а с добавкой синтезированных алюмосиликатов в количестве 30 % от массы цемента – 2,17 % (рис. 1, кривая 5). По сравнению с традиционными добавками (Vermokool, метилцеллюлоза) добавка синтезированных алюмосиликатов при одинаковом содержании (1 % от массы цемента) также обладает большей влагоудерживающей способностью. Влагосодер-

жание цементных образцов с добавками Vermosool 425, метилцеллюлоза марки FMC 2094 составляет соответственно 0,39 % и 0,35 %, а с добавкой синтезированных алюмосиликатов – 1,42 % (рис.2).

На рис. 3 приведены экспериментальные данные оценки прочности цементных образцов. Для изготовления образцов было выбрано оптимальное соотношение воды и цемента, отношение В/Ц, равное 43 %.

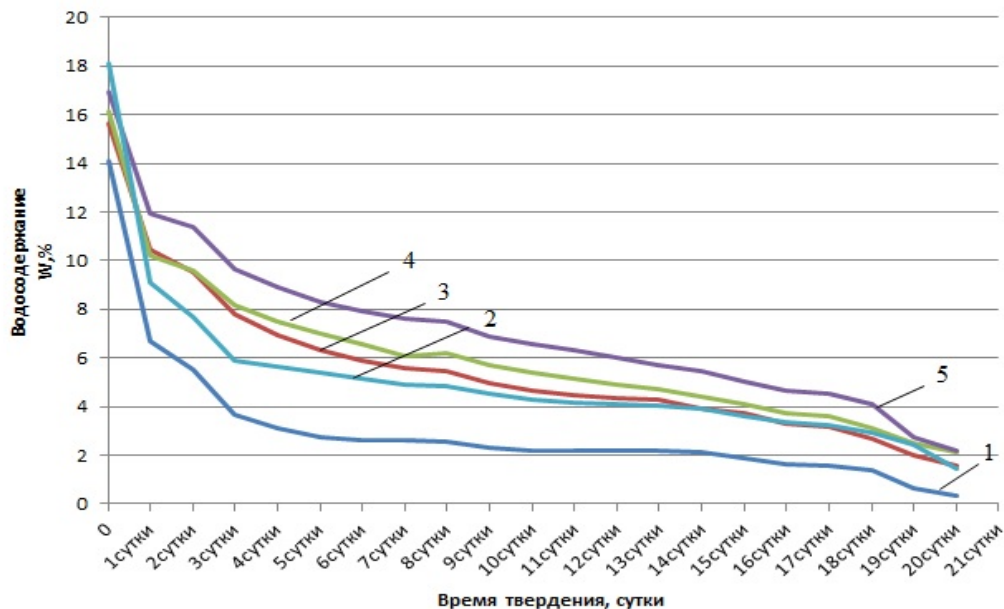


Рис. 1. Кинетика высыхания цементных образцов:

- 1 – контрольный образец; 2 – содержание добавки 1 % от массы цемента; 3 – содержание добавки 10 % от массы цемента; 4 – содержание добавки 20 % от массы цемента; 5 – содержание добавки 30 % от массы цемента

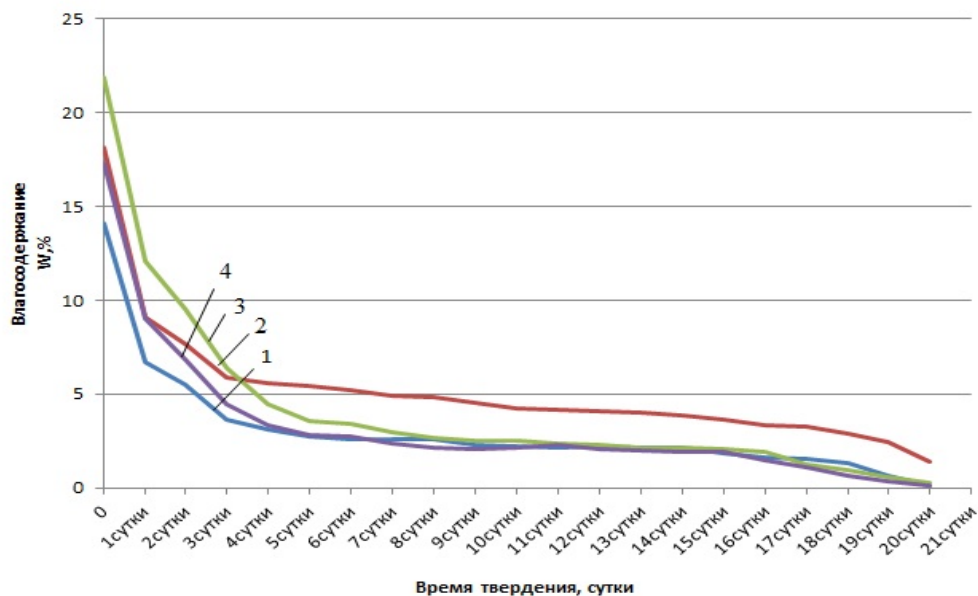


Рис. 2. Кинетика высыхания цементных образцов:

- 1 – контрольный образец; 2 – содержание синтезированной добавки 1 % от массы цемента; 3 – содержание добавки метилцеллюлозы марки FMC 2094 – 1 % от массы цемента; 4 – содержание добавки Vermosool 425 – 1 % от массы цемента

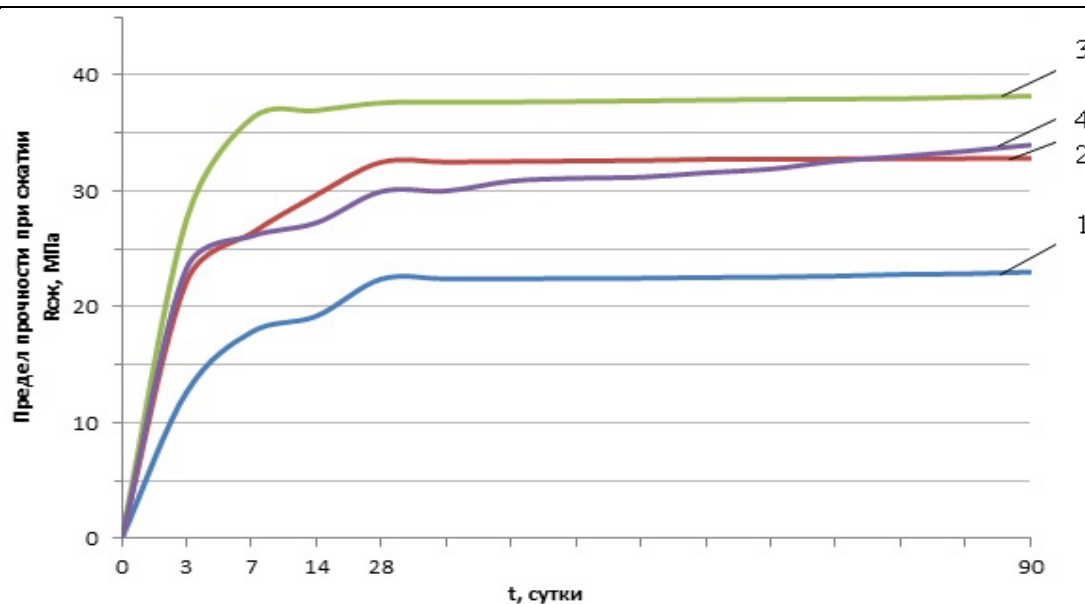


Рис. 3. Кинетики твердения в воздушно-сухих условиях цементных образцов:  
 1 – контрольный образец; 2 – содержание добавки синтезированного алюмосиликата 10 % от массы цемента; 3 – содержание добавки 20 % от массы цемента; 4 – содержание добавки 30 % от массы цемента

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис.3, свидетельствует, что введение в рецептуру синтезированной добавки приводит к повышению прочности при сжатии цементных образцов в возрасте 28 суток воздушно-сухого твердения на 23,99-54,42 % в зависимости от содержания добавки по сравнению с образцами на основе контрольных составов (без добавки). Очевидно, водоудерживающий эффект добавки способствует более благоприятному процессу гидратации цемента.

Нами определялось количество свободной извести в образцах в возрасте 28 суток, твердевших в воздушно-сухих условиях. Наблюдается уменьшение содержания свободной извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Так, содержание извести в контрольном образце составляет 13 %, в образцах с содержанием добавки 10 %, 20 % и 30 % от массы цемента соответственно 11 %, 6,5 % и 4,5 %. Полученные результаты свидетельствуют о взаимодействии синтезируемой добавки со свободной известью.

Проведенные исследования свидетельствуют, что синтезированные алюмосиликаты обладают водоудерживающим и структурообразующим действием и могут применяться в рецептуре плиточных клеев взамен импортных добавок метилцеллюлозы и Vermocoal.

#### Список литературы

1. Строкова, В.В. Свойства синтетических нанотубулярных гидросиликатов / В.В. Строкова, А.И. Везенцев, Д.А. Колесников, М.С. Шиманская // Вестник БГТУ им. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – № 4. – С. 30–34.
2. Логанина, В.И. Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 3. – С. 20–23.
3. Володченко, А.Н. Силикатные автоклавные материалы с использованием нанодисперсного сырья / А.Н. Володченко, В.С. Лесовик // Строительные материалы. – 2008. – №11. – С. 42–44.
4. Логанина, В.И. Исследование закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Строительные материалы. – 2011. – № 12. – С. 63.

5. Логанина, В.И. Свойства известковых композитов с силикатсодержащими наполнителями / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Строительные материалы. – 2012. – № 3. – С. 30-31.

6. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9. – С. 36–39.

7. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 4. – С. 37–42.

### References

1. Strokova, V.V. Properties of synthetic hydro nanotubular / V.V. Strokova, A.I. Vezentsev, D.A. Kolesnikov, M.S. Shimanskaya // Herald BSTU n. Shukhov. – Belgorod Univ BSTU, 2010. – № 4. – P. 30–34.

2. Loganina, V.I. Influence on the properties of activated diatomite lime compositions / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // News of higher educational institutions. Building. – 2011. – № 3. – P. 20–23.

3. Volodchenko, A.N. Autoclave silicate materials with nanometer-sized materials / A.N. Volodchenko, V.S. Woodsman // Building Materials. – 2008. – № 11. – P. 42–44.

4. Loganina, V.I. Study patterns of influence of silica sol on structure and properties of diatomite / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Building Materials. – 2011. – № 12. – P. 63.

5. Loganina, V.I. Properties lime composites silikatsodezhaschimi fillers / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Building Materials. – 2012. – № 3. – P. 30–31.

6. Loganina, V.I. Prospects manufacture of organo-mineral supplement based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petuhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // Proceedings of Higher Education institutions. Building. – 2009. – № 9. – P. 36–39.

7. Loganina, V.I. Rheological properties of the composite lime binder with synthetic zeolites / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // News of higher educational institutions. Building. – 2013. – № 4. – P. 37–42.

*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

**Гусев Николай Иванович**,  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Управление качеством  
и технологии строительного производства»  
Тел.: (8412) 92-69-29

**Паршина Ксения Сергеевна**,  
студентка гр. АРХ-41

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Gusev Nikolai Ivanovich**,  
Candidate of Sciences, Professor of the  
department «Quality management and  
Technology of construction production»  
Tel.: (8412) 92-69-29

**Parshina Ksenia Sergeevna**,  
student of group ARH-41

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

## ПОЛЫ С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ КАЧЕСТВАМИ

Н.И. Гусев, К.С. Паршина, М.В. Кочеткова

Приведена технология устройства полов, отличающихся повышенной коррозионно-стойкостью к агрессивным средам, на предприятиях пищевой промышленности; приведены технологические рекомендации по устройству полов на основе полиуретановой и эпоксидной смол.

*Ключевые слова: основания под пол, наливной пол, армирование оснований, эпоксидная смола, полиуретановая смола, выдержка пола.*

## FLOORS WITH IMPROVED QUALITIES

N.I. Gusev, K.S. Parshina, M.V. Kochetkova

The authors consider the technology of making floors, characterized by increased corrosion resistance to aggressive environments in food industry enterprises, give technological recommendations on construction floors based on polyurethane and epoxy resins.

*Keywords: floor foundation, reinforcing bases, epoxy resin, polyurethane resin, floor curing.*

Полы в любом здании являются важнейшим элементом интерьера и элементом, функционально выполняющим различные задачи эксплуатационного характера. Именно на решение этих задач были направлены исследования, связанные с технологией устройства полов для разных помещений и учитывающие их стойкость к агрессивным воздействиям различных сред, термическую стойкость, а также межремонтные периоды (долговечность). Полы, как правило, называются по типу эксплуатационного покрытия. Прежде всего, полы должны быть эстетичными и соответствовать назначению помещения. Так, в вестибюле дома не делают паркетные полы, а в спальном комнате – бетонные или даже мраморные.

Кроме того, в жилых помещениях, а также в помещениях с долговременным пребыванием людей нельзя делать «холодные полы» [1]. Такие полы должны иметь коэффициент теплоусвоения не более 11,6 Вт/м<sup>2</sup>°К. Но эти же полы должны быть прочными, не продавливаться под ножками мебели, т.е. обладать механической прочностью не менее 10 МПа, однако каменные материалы с такой прочностью имеют высокую плотность и, следовательно, не способны иметь требуемых коэффициентов теплоусвоения, т.е. полы будут «холодные».

В наибольшей степени таким требованиям отвечают полы из дерева, но они не везде применимы из-за других, уже технологических, свойств. Так, полы в поме-

щениях промышленного назначения, как правило, требуют повышенной прочности, низкого водопоглощения, высокой трещиностойкости [2, 3].

Хорошими эксплуатационными достоинствами обладают полы из керамической плитки, отличающиеся высокой износостойкостью и гигиеничностью. Однако эти полы характеризуются обилием швов, в которых скапливаются вредные и болезнетворные микроорганизмы. Они «холодные», а главное, они легко разрушаются органическими кислотами и не могут быть рекомендованы для производств, технологически связанных с выделением кислот и щелочей.

Совершенно уникальными свойствами должны обладать материалы для устройства полов на предприятиях пищевой промышленности (производство молочных продуктов – сыра или масла, мороженого; пивоваренное и дрожжевое производство; производство мясных и рыбных продуктов, выпуск консервов, соков, а также фармацевтическое производство и др.). Органические кислоты, образующиеся на этих предприятиях, способны разрушать керамику и цементный камень. Довершают дело микроорганизмы, скапливающиеся в трещинах, швах и разломах полов.

На ряде производств пол может подвергаться сильному тепловому воздействию. Это пекарни, где кроме печей, тепло излучают контейнеры с горячей выпечкой. В мясо-рыбных, консервных и других производствах тепло выделяется при обработке паром и горячей водой полов и оборудования. Знакопеременное тепло отрицательно сказывается на прочности полов.

Пол, как правило, представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из верхнего слоя или покрытия. В зависимости от материала, используемого в качестве покрытия, называют и пол – линолеумный, мозаичный (террацевый), паркетный, плиточный, эпоксидный и др. Вторым слоем, влияющим на прочность и долговечность конструкции всего пола, является основание под покрытие, которое может быть из бетона или раствора. Прочность основания под любое покрытие должна быть не менее 10 МПа, а при наличии технологического транспорта и иных механических воздействиях на пол эта прочность должна доходить, а иногда и превышать 60-70 МПа [2, 3].

Однако чисто механическая прочность не решает всех проблем целостности основания. К серьезным последствиям приводит трещинообразование. Трещины могут возникать вследствие усадочных деформаций в ходе созревания материала основания, а также вследствие температурных деформаций в эксплуатационный период. Эти трещины развиваются в хрупком материале с высоким модулем упругости. Введение в материал полимера может наполовину снизить модуль упругости, т.е. сделать материал более эластичным. Однако эта мера кардинально не решает проблем температурных деформаций. В этом случае материал основания необходимо армировать. Армирование можно выполнить, например, полипропиленовым волокном, которое значительно сокращает трещинообразование, особенно активно проявляющееся в первые сутки стабилизации материала основания, в частности, цементного бетона или полимербетона. Для исключения трещинообразования можно использовать армирование основания стеклотканью или применять сетчатое металлическое армирование.

В последнее время для устройства оснований все чаще стали применять фибробетон. Это цементно-песчаная композиция, в которую добавлены волокна фибры, т.е. тонкие, диаметром 0,3-1,0 мм стальные волокна длиной 5-10 см. После хорошего перемешивания всей массы материала можно получить основание с дисперсным армированием, которое обладает высокой трещиностойкостью [4].

При устройстве полов по грунтовому основанию в конструкцию пола следует ввести слой гидроизоляции. Ее можно выполнить из двух слоев бризола, склеенных по швам с нахлесткой 10 см. Гидроизоляцию нужно уложить на бетонную подготовку из бетона класса В10 толщиной 10-15 см. Грунт нужно предварительно уплотнить катками с втапливанием в поверхность грунта щебня. Гидроизоляция необходима как для предотвращения поступления воды из грунта в помещение, так и для защиты подстилающих слоев грунта от агрессивных производственных жидкостей.

Лотки и трапы, применяемые для сбора производственных жидкостей, необходимо делать с покрытиями, идентичными покрытиям пола, что предотвратит их от разрушения технологическими стоками.

Прежде чем приступить к устройству покрытия наливного пола, нужно выбрать состав покрытия на основании характеристики агрессивных жидкостей, их concentra-

ции и температуры с учетом назначения помещения, и освидетельствовать основание под покрытие. Покрытие пола может быть разной толщины и выполняться различными рабочими приемами. Бывают покрытия тонкослойные, ненаполненные – толщиной до 0,5 мм, получаемые путем окрашивания. Самовыравнивающиеся покрытия делают толщиной около 5 мм с количеством наполнителя по весу не более половины массы состава. Высоконаполненные составы необходимо применять в покрытиях толщиной 5-20 мм. Объем наполнителя по весу может достигать 90 %.

Для самовыравнивающихся покрытий поверхность оснований должна быть строго горизонтальной во избежание стекания по уклону наливной массы пола. Под все типы покрытий поверхности делают ровными и гладкими, без раковин и с заданной прочностью. Недостаточно прочные поверхности основания укрепляют шлифованием с помощью шлифовальных машин, снабженных абразивными камнями или алмазными кругами. Шлифование позволяет вскрыть все дефекты бетонирования, обнажает заполнитель, вскрывает поры бетона, что увеличивает адгезию на границе бетон–полимер. При шлифовке с основания снимается слой бетона до 1мм. После шлифовки целесообразно удалить промышленным пылесосом всю пыль и обезжирить поверхность основания.

Кроме шлифовки поверхность бетонного основания можно упрочнить пропиткой грунтовочными составами на основе маловязкой полимерной композиции. Для этого нужно применять химически активные, хорошо проникающие в поры бетона жидкости на основе фторосиликата магния, акрила, эпоксидной смолы, дивенилстирольного латекса, полиуретана и др. Непосредственно перед нанесением грунтовки на основание поверхность необходимо снова обеспылить.

При наличии в основании раковин, даже мелких, выколов, углублений поверхность следует прошпаклевать сплошным слоем «на сдир» или локальными пятнами. Слой шпаклевки должен быть не более 0,5 мм на основе тиксотропной полимерной композиции. Наполнителем в шпаклевке может быть молотый кварц или маршалит.

После полимеризации шпаклевого слоя на поверхность наносят первый высоконаполненный слой эпоксидного компаунда толщиной 2,5 мм, который после затвердения шлифуют. Второй лицевой слой ненаполненного эпоксидного компаунда толщиной 1,5 мм наносят на заключительном этапе. С целью увеличения износостойкости покрытия на него можно нанести полиуретановое покрытие в два слоя толщиной 0,3 и 0,2 мм.

В настоящее время известен обширный ассортимент полимерных добавок в полимерцементные композиции. Эти же полимеры можно использовать и для устройства наливных покрытий полов в помещениях с агрессивными средами.

Как показала практика применения и лабораторные испытания, хорошими свойствами для покрытий пола в агрессивных средах обладают эпоксидные и полиуретановые компаунды. Эти покрытия, даже длительное время находящиеся в агрессивных средах, не снижают свою первоначальную прочность, а, напротив, даже ее увеличивают. Эпоксидные компаунды не снижают прочностные показатели в покрытиях, выдерживают раствор кальцинированной соды, горячую воду, 2 %-й раствор уксусной кислоты, насыщенный раствор поваренной соли и 1 %-й раствор серной кислоты с температурой около 100 °С. Отличные результаты получены при проверке воздействия на эпоксидное покрытие пола молочной сыворотки, жира и крови. Наилучшие показатели получены по эпоксидной смоле марки ЭД-6. Высокой эластичностью и вместе с тем прочностью отличается состав, в который введен для отверждения дибутилфтолат в количестве 15-20 %. На пищевых предприятиях известны эпоксидные полы серии полиплан. Это бесшовные наливные полы, применяемые в промышленных и гражданских зданиях. Их делают в помещениях с высокими механическими и динамическими нагрузками при одновременном воздействии агрессивных жидкостей. Они могут быть выполнены в производственных помещениях мясомолочной промышленности, фармацевтики, в складских помещениях, автомойках, паркингах и т.п. Эти полы соответствуют всем санитарно-гигиеническим требованиям и нормам. Эпоксидные полы не пылят, хорошо сопротивляются истиранию, не имеют швов, весьма эстетичны, их легко убирать. Они не разрушаются от химически агрессивных веществ. Срок службы эпоксидных полов превышает 15-20 лет.

В помещениях с высокими механическими и транспортными нагрузками, таких, как гаражи, паркинги, мастерские, склады тяжелых грузов и т.п. эпоксидные полы

делают толще, увеличивая до 4 мм. Устройство такого пола включает операции по нанесению на прочное основание эпоксидной грунтовки, нанесению базового слоя, армированного кварцевым песком, и нанесению лицевого эпоксидного слоя толщиной 0,5 мм. К основаниям под покрытие предъявляются и другие требования, в частности, влажность основания должна быть не более 4 %. Температура основания указывается обычно в рецептуре состава полимерной композиции. Она должна оставаться в пределах +15 °С. При более низкой температуре состав покрытия хуже растекается, что неизбежно приводит к увеличению расхода дорогостоящего материала. Кроме того, ухудшается и внешний вид покрытия. Высокая температура состава как для покрытия, так и для основания способствует более быстрому отверждению полимерной составляющей, что также способствует снижению качества покрытия.

Повышенная влажность (свыше 80 %) в помещениях, где укладывают покрытие, может вызвать конденсацию влаги на его поверхности, которая способна привести к негативным последствиям.

Эпоксидные покрытия позволяют ходить по полам уже через сутки, а через 5-7 суток полы считаются готовыми к условиям эксплуатации.

Весьма износостойчивые наливные полы делают на основе метилметакриловых смол. Такие полы имеют высокие гигиенические достоинства. Они не пылят, могут быть гладкими и не скользкими. Их делают бесшовными. Полы легко ремонтируются, а при ремонте не нарушается их герметичность. Они способны выдерживать длительное воздействие горячей и холодной воды. Обладают стойкостью ко многим агрессивным средам, в частности к растворам кислот и щелочей, а также к маслам и нефтепродуктам. Они инертны к ультрафиолетовому облучению.

Покрытия из метилакрелата применяют на молочных и мясорыбных предприятиях и на других производствах пищевой промышленности, а также в фармацевтических производствах. Их применяют на наиболее напряженных участках производства с высокими транспортными нагрузками. При толщине 3 мм покрытие выдерживает нагрузки до 15 т.

Полы на основе метилметакриловых смол достаточно технологичны. По покрытию можно ходить уже через 2 часа после укладки. Они могут быть многоцветными с использованием минеральных щелочестойких пигментов. Межремонтный срок эксплуатации полов составляет 15 лет.

Высокими эксплуатационными достоинствами обладают самовыравнивающиеся покрытия на основе полиуретана. После полимеризации прочность на сжатие цементно-полиуретанового композитного материала может превышать 60 МПа. Он имеет хорошую адгезию к бетону основания (около 3 МПа) и, самое главное, успешно сопротивляется вредному воздействию на полы агрессивных технологических сбросов пищевых предприятий, особенно мясомолочной отрасли.

Цементно-пролиуретановый композитный материал представляет собой смесь из трех компонентов, к которым относится водная дисперсия полиуретановой смолы, отвердитель и гидравлическое вяжущее – цемент, в который может быть добавлен щелочестойкий пигмент требуемого цвета. В смесь вводят также добавки, улучшающие ее реологические характеристики, и фракционированный наполнитель, формирующий скелет материала.

Все компоненты точно дозируют по весу и перемешивают, начиная со смолы и отвердителя, которым затворяют сыпучую часть композита.

В зависимости от термических и механических нагрузок покрытия выполняют разной толщины. Основания под покрытия должны быть прочные или упрочненные, как указывалось ранее, шлифовкой или мокрым способом. Возможна укладка покрытия и на недавно уложенный бетон основания через 5-7 дней после его укладки. При этом нужно иметь в виду, что цементно-полиуретановые композиты можно укладывать на основание с влажностью до 10 % благодаря их паропроницаемости, в то время как под другие полимерные композиты допускается влажность основания не выше 4 %.

Высокая прочность и термическая стойкость цементно-полиуретановых покрытий после их отверждения объясняется взаимодействием друг с другом эластомерной и цементной матриц при одновременно химической стойкости и износостойкости, ударопрочности, способности к сопротивлению атмосферным воздействиям.



Благодаря высоким физико-механическим и экологическим характеристикам цементно-полиуретановые покрытия могут быть рекомендованы для применения практически в любой сфере производства и быта человека. Это относится и к зданиям общественного назначения, включая зрелищные объекты, административно-бытовые помещения, автомастерские, музеи, аэропорты, вокзалы и т.п.

Технология создания цементно-полиуретанового покрытия по готовому прочному основанию включает в себя обеспыливание основания, удаление всех частиц старого покрытия, просушку, удаление масел, жиров и грязи.

Следующей операцией является нанесение на основание полиуретановой грунтовки. Ее наносят кистью или валиком. Можно наносить и распылителем из краскопульта (безвоздушное распыление).

После высыхания грунтовки производят смешивание до полной однородности всех составляющих при температуре в зоне производства работ от +10 °С до +25 °С. Полученную смесь наносят на поверхность с помощью зубчатого шпателя, обеспечивающего заданную толщину наносимого слоя. При толщине слоя до 0,5 мм покрытия называют тонкослойными или эмалевыми, которые выполняют приемами окрашивания. Самовыравнивающиеся покрытия из цементно-полиуретановой смеси наносят слоем до 5 мм, включая в смесь наполнитель в объеме до 50 %. Высоконаполненные составы наносят слоем до 20 мм с армированием покрытия кварцевым песком в объеме до 90 %. Такие покрытия называют высоконаполненными. Они в наибольшей степени не восприимчивы к термошокам и циклически изменяющимся температурам.

Цементно-полиуретановые покрытия устойчивы к целому кругу вредных для иных типов полов агрессивных соединений, в том числе молочной кислоте, жиру, крови, углеводородам, к большинству растворителей, щелочам, солям и другим агрессивным составам, а также к пару и горячей воде. Эти покрытия можно успешно применять там, где требуется высокая химическая, термическая и механическая стойкость. Цементно-полиуретановые покрытия отличаются долговечностью. Их межремонтный срок службы составляет свыше 25 лет, т.е. столько, сколько служат без ремонта в зданиях конструктивные элементы общего назначения.

Нужно также учесть, что вредные эмульсии полиуретановых смол не содержат каких-либо токсичных веществ, а их цементная матрица обеспечивает полную негорючесть композитного материала.

В настоящее время успешно развивающаяся пищевая промышленность требует внедрения новых технологий. Таким образом, современные конструкции полов с применением предлагаемых материалов и технологий их устройства более долговечны, способствуют улучшению санитарно-эпидемиологического климата в производственных помещениях, а следовательно, росту производительности труда и объемов выпускаемой продукции.

#### Список литературы

1. СНиП 2.03.13–88. Полы. – М.: Госстрой СССР, 1989. – С.17.
2. СНиП 3.04.01–87. Защитные, изоляционные и отделочные покрытия. – М.: Госстрой СССР, 1988. – С.61.
3. Гусев Н.И. Типы современных полов и их эксплуатация / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, К.С. Паршина // Наука и образование: Проблемы развития строительной отрасли: тр. Международ. науч. конф. – Пенза: ПГУАС, 2012. – С49–52.
4. Гусев Н.И. Наливные полы в помещениях различного назначения / И.Н. Гусев, Ю.П. Скачков, М.В. Кочеткова // Сухие строительные смеси. – 2013. – №6. – С24–28.

#### References

1. SNIP 2.03.13–88. Floors. – M.: USSR State, 1989. – С.17.
2. SNIP 3.04.01–87. Protective, insulating and finishing coatings. – M.: USSR State, 1988. – P.61.
3. Gusev, N.I. Modern types of floors and their exploitation / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, K.S. Parshin // Science and Education: Problems of development of the construction industry: tr. Mezhdunar.nauch. conf. – Penza: PGUAS, 2012. – С49–52.
4. Gusev N.I. Leveling floors in different rooms / N.I. Gusev, Yu.P. Skachkov, M.V. Kochetkova // Dry mixes. – 2013. – № 6. – С.24–28.

УДК 504:628.3

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Демьянова Валентина Серафимовна,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав.кафедрой «Инженерная экология»,  
почетный работник высшего  
профессионального образования РФ

**Гусев Алексей Дмитриевич,**  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры  
«Инженерная экология»

**Денисова Наталья Анатольевна,**  
аспирант кафедры «Инженерная экология»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Demyanova Valentina Serafimovna,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Engineering ecology», Honorary  
scholar of Higher Professional Education of  
the Russian Federation

**Gusev Aleksey Dmitrievich,**  
Candidate of Sciences, Senior lecturer of the  
department «Engineering ecology»

**Denisova Natalia Anatolievna,**  
Student of the Department of engineering  
ecology

## ГИБКАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ ЧЕРЕПИЦА ИЗ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

В.С. Демьянова, А.Д.Гусев, Н.А.Денисова

Предложена технология разработки гибкой строительной черепицы из резиновой крошки – продукта переработки изношенных автомобильных шин. Приведены её физико-механические и эксплуатационные свойства.

*Ключевые слова: строительная черепица, переработка изношенных автомобильных шин, свойства.*

## FLEXIBLE CONSTRUCTION TILES FROM WORN-OUT TIRES

V.S. Demyanova, A.D. Gusev, N.A. Denisova

The authors offer technology for development flexible construction tiles made from rubber crumb – product of processing worn automobile tires. Its physico-mechanical and operational properties are given.

*Keywords: building tiles, processing of worn-out tires, properties.*

Предлагаемая резиновая черепица представляет собой композиционный материал, состоящий из двух слоев. Основной слой представлен прессованной резиновой крошкой. В качестве связующего для крошки предлагается полиуретановый клей зарубежных (TOP-UR-E-PVC, TOP-UR-40) и отечественных (УР-600, ТУ 2252-021-13238275-01) производителей [1]. Рассматривается возможность применения в качестве связующего продуктов переработки пластика. Наиболее крупнотоннажными полимерными отходами являются отходы термопластов и эластомеров. Значительную долю среди термопластов занимают полиэтилены низкого давления (ПЭНД). Среди отходов, содержащих эластомеры, основная часть приходится на изношенные автомобильные шины. Установлен температурный режим получения кровельного материала с использованием в качестве основного компонента резиновой крошки – продукта переработки изношенных шин и ПЭНД. Нижняя граница смешения компонентов ограничивается температурой плавления используемого связующего, а верхняя граница – температурой начала деструкции резиновой крошки [2]. Термическое окисление резиновой крошки начинается при температуре свыше 170 °С. Исходя из этого температурный режим изготовления кровельной черепицы, в зависимости от используемой фракции резиновой крошки на основе ПЭНД, составляет 110...150 °С.

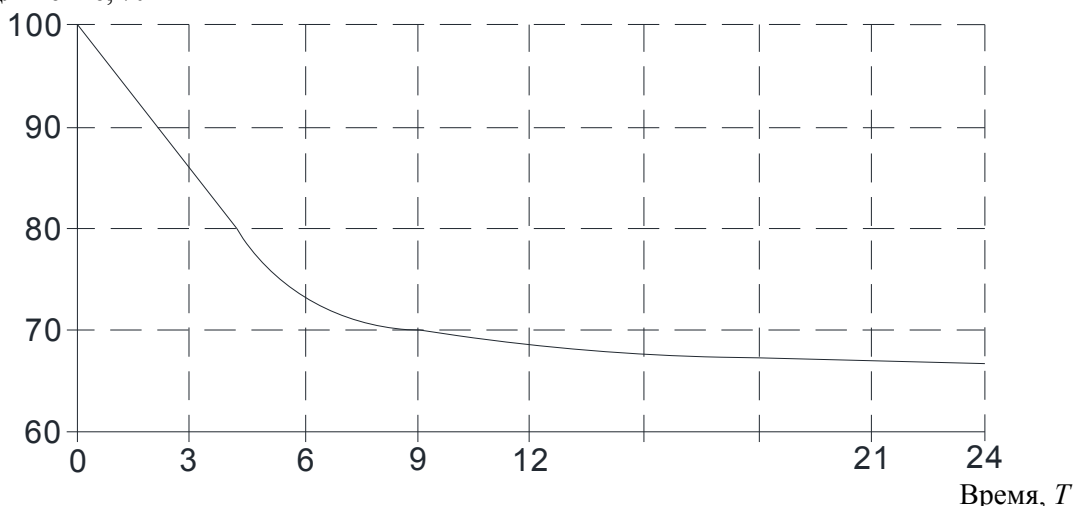
Получение опытных образцов черепицы осуществлялось на одношнековом экструдере двумя способами: смешением в расплаве при температуре выше температуры плавления полимера и смешением при воздействии градиента температур и сдвигового деформирования (соизмельчение). Соотношение «резиновая крошка / ПЭНД» принималось 60/40 и 80/20. Состав резиновой крошки, получаемой механическим способом на установке КППШ-1: фр. 0...0,5 – 5 %, фр. 0,5...1,2 – 25 %, фр. 1,2...2,2 – 29 %, фр. 2,2...3,2 – 39 %, фр. 3,2...4,2 – 49 % [1].

Установлено превышение деформационно-прочностных свойств опытных образцов, полученных в режиме соизмельчения, относительно аналогичных показателей, образуемых смешением в расплаве, в среднем на 25 % независимо от соотношения «резиновая крошка / ПЭНД». Это обусловлено более качественным смешением связующего с резиновой крошкой и однородностью распределения частиц резинового порошка по объему материала.

Получаемая резиновая черепица обладает значительной гибкостью и эластичностью, высокой вибро- и шумоизоляцией, водонепроницаемостью. Для придания оригинального вида и повышения прочности сцепления с резиновым слоем по верхнему основанию черепицы возможно устройство гранулированного покрытия в виде присыпки из измельченных отходов каменных горных пород, повышающего стойкость к действию ультрафиолета.

Практический и научный интерес представляет изучение эксплуатационных свойств предлагаемой строительной черепицы. Оценка долговечности кровельных материалов базируется на результатах исследования характера и степени изменения исходных физико-механических показателей кровельного покрытия при комплексном воздействии климатических факторов и агрессивной среды. Согласно данным [3], за основной эксплуатационный показатель, характеризующий работоспособность кровельного ковра, принимается величина упругодеформативного показателя. Для оценки надежности черепицы были проведены исследования образцов кровельного материала после ускоренного старения под воздействием различных климатических факторов: ультрафиолетового облучения; нагревания при температуре 80 °С; попеременного замораживания и оттаивания [1]. Результаты комплексного воздействия исследуемых климатических факторов представлены на рисунке.

Относительное  
удлинение, %



Изменение относительного удлинения образцов кровельной черепицы в зависимости от комплексного воздействия климатических факторов

Значительное снижение деформативности кровельной черепицы на основе резиновой крошки при воздействии климатических факторов наблюдается в первые 7–8 месяцев эксплуатации, что обусловлено процессами старения связующего.

Полученные показатели физико-механических и эксплуатационных свойств резиновой гибкой черепицы могут быть использованы для накопления банка данных с целью создания нормативной базы строительного кровельного материала с использованием отходов. Применение вторичных материальных ресурсов на основе техногенных образований и отходов способствует существенному сокращению объемов производства, специально изготавливаемых промышленных материалов, снижению техногенной нагрузки на окружающую среду [4]. Предлагаемая строительная черепица с использованием отходов способствуют развитию эколого-экономической концепции управления урбанизированными территориями, повышению качества жизни и здоровья населения. Разработка строительного материала, позволяющего заменить первичное сырье на продукты переработки, является актуальным направлением, создающим рыночные механизмы для сбора и переработки всех видов отходов.

#### Список литературы

1. Демьянова, В.С. Эффективные строительные материалы с использованием техногенных отходов: моногр. / В.С. Демьянова, А.Д. Гусев. – Пенза, 2012. – 128 с.
2. Артемов, В.М. Изучение влияние природы резиновой крошки и температуры смешения на свойства резинобитумных композиций / В.М. Артемов, М.Л. Купермид // Производство шин, резинотехнических изделий. – 1983. – №7. – С.4–7.
3. Макеев, В.В. Эксплуатационная надежность конструкций кровель из резино-полимерных рулонных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Макеев. – М., 2005. – 20 с.
4. Калашников, В.И. Быстротвердеющие высокопрочные бетоны с органоминеральными модификаторами / В.И. Калашников, В.С. Демьянова. – Пенза: ПГУАС, 2003. – 195 с.

#### References

1. Demyanova, V.S. Efficient construction materials with the use of industrial wastes: monogr. / V.S. Demyanova, A.D. Gusev. – Penza, 2012. – 128 p.
2. Artemov, V.M. Study of the influence of the nature of rubber crumb and mixing temperature on the properties of compositions / V.M. Artemov, M.L. Kupermid // Production of tires, rubber technical products. – 1983. – №7. – P.4–7.
3. Makeev, I.V. Operational reliability of constructions of roofs from rubber-polymeric rolled materials: avtoref. dis.... kand. tehn. Sciences / I.V. Makeev. – M., 2005. – 20 p.
4. Kalashnikov, V.I. Fast curing high performance concretes with organic modifiers / V.I. Kalashnikov, V.S. Demyanova. – Penza: PGUAS, 2003. – 195 p.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.156.4

*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»

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

**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»

*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  
Russian Academy of Architectural and  
Building Science, rector, Professor of the  
department «Building designs»

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

**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»

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РОСТВЕРКОВ

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

Учитывая сложную работу и несовершенство существующих методов расчета ростверков свайных фундаментов, эти конструкции, безусловно, нуждаются в дополнительных экспериментально-теоретических исследованиях и корректировке расчетов на прочность.

*Ключевые слова: ростверк, напряженно-деформированное состояние, разрушение.*

## EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE GRILLAGE

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

Taking into account the complexity of the work and imperfection of the existing methods of grillage pile foundations calculation, these designs certainly need to be additionally theoretically and experimentally studied on durability.

*Keywords: grillage, stress-strain state, destruction.*

Ростверки выполняют функцию перераспределения нагрузки от вышерасположенных конструкций на сваи-опоры и основание. Авторами статьи была реализована комплексная программа по изучению напряженно-деформированного состояния (НДС) ростверков свайных фундаментов на базе физического и численного экспериментов [1–3]. Основное внимание уделено ленточным ростверкам свайных фундаментов с двухрядным расположением свай. Нормативные методы расчета ленточных ростверков несовершенны. Расчеты ведутся по принципу неразрезных балок, и все внимание сконцентрировано на работе ростверков в продольном направлении. При этом не учитывается схема расположения свай (однорядных, двухрядных или шахматных) и смещение действующей нагрузки относительно продольной оси ряда свай. Учитывая незначительную величину шага свай (в пределах  $3d \div 6d$ ) [1], наиболее опасной может оказаться работа ростверка не в продольном, а в поперечном направлении. В поперечном направлении нормы предлагают рассчитывать двухрядный ростверк как однопролетную балку на двух опорах. При этом не указывается ширина расчетного сечения, не учитываются величина пролета среза и большие размеры поперечного сечения свай-опор.

С целью выявления реальной картины напряженно-деформированного состояния ростверков с двухрядным расположением свай был проведен физический эксперимент с разрушением опытных образцов по сжатой зоне. Испытано 3 образца ростверков. Опытные образцы проектировались в виде моделей в масштабе 1:3 прямоугольного сечения  $50 \times 17$  см. В поперечном направлении образцы ростверков имели одинаковый пролет среза  $L_1 / h_0 = 2,0$ . Образцы армировались сеткой из стержней  $\varnothing 12$  и  $\varnothing 8$  мм класса А-III. С целью надежной анкеровки продольная арматура отгибалась по контуру ростверка (рис. 1). Шаг свай изменялся соответственно пролету среза  $a / h_0$ , равному 0,5, 1,0 и 1,5. Длина образцов составляла 121 см, 94 см и 67 см (рис. 2). Поперечной арматурой образцы не армировались. Испытание ростверков проводилось в спецлаборатории Пензенского ГУАС при условиях, максимально приближенных к реальным.

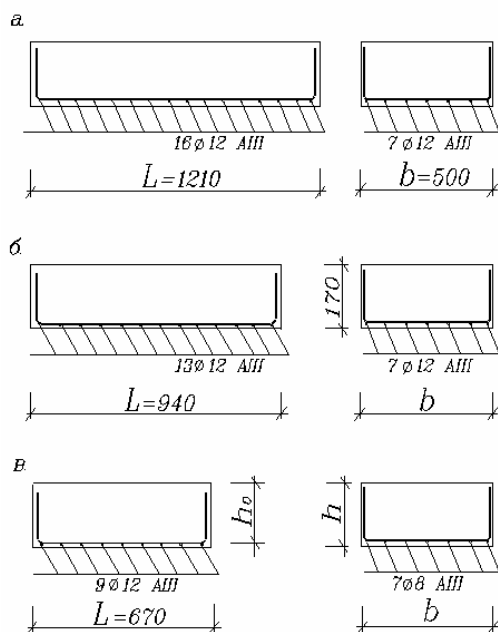


Рис.1. Схемы армирования образцов ростверков:  
а – РД-1-1; б – РД-1-2; в – РД-1-3

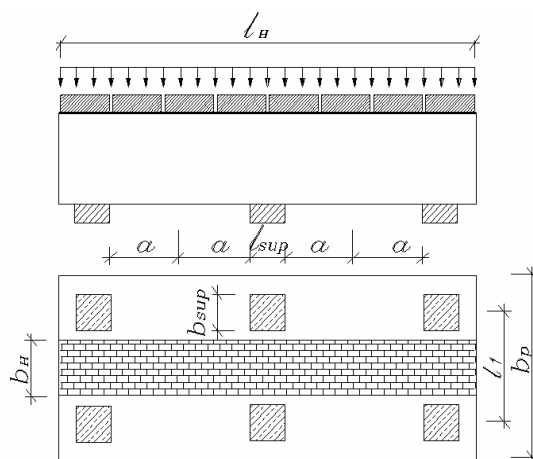


Рис.2. Схема нагружения образцов при испытании

В ходе проведения эксперимента на каждом этапе нагружения фиксировалось образование и развитие трещин.

В образце РД-1-3 с малым пролетом среза ( $a/h_0=0,5$ ) первыми образовались нормальные трещины в середине пролета ростверка в поперечном направлении – трещины Т-Р (рис. 3, 4). Величина нагрузки, соответствующая появлению этих тре-

щин, составила 0,25–0,38 от разрушающей ( $P_{\text{разр}}$ ). С дальнейшим увеличением нагрузки трещины типа Т-Р развивались с малой активностью, а при нагрузке 0,5–0,65 от  $P_{\text{разр}}$  их рост прекратился.

После образования нормальных трещин с дальнейшим увеличением нагрузки появились наклонные трещины в поперечном направлении Т-Н1(2). Величина нагрузки к моменту появления этих трещин составила 0,45–0,65 от  $P_{\text{разр}}$ . Общим для них является то, что они имели примерно одинаковый угол наклона, характеризуемый наклонной линией, соединяющей внутреннюю грань штампа или его середину с центром грузовой полосы. Трещины Т-Н1(2) активно развивались с ростом нагрузки и явились критическими для данного образца. Ширина их раскрытия к моменту разрушения составила 0,5–2 мм.

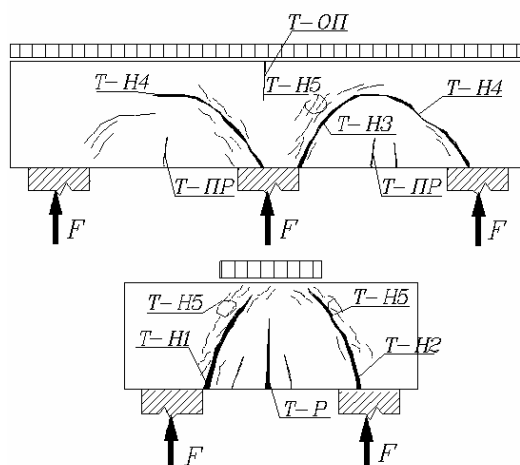


Рис. 3. Классификация и схема развития трещин

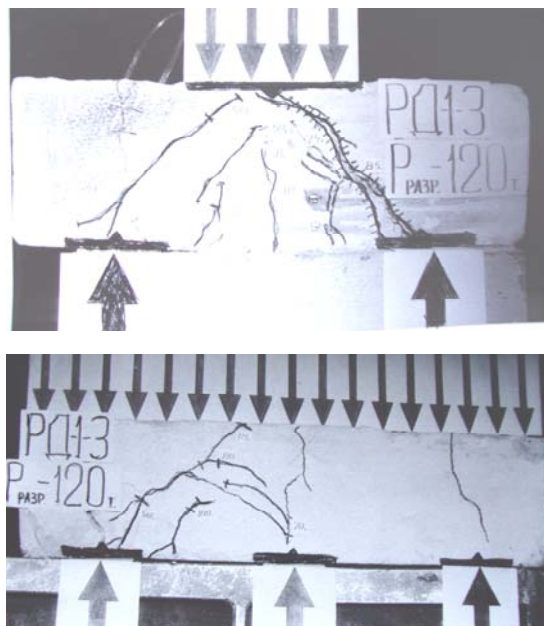


Рис. 4. Характер образования трещин и вид разрушения образца РД-1-3

При нагрузке, близкой к разрушающей (0,7–0,9  $P_{\text{разр}}$ ), образовывались прерывистые наклонные трещины – Т-Н5 вдоль трещин Т-Н1. Появление данных трещин можно объяснить началом разрушения бетона в наклонных сжатых полосах. На продольных гранях ростверка отмечается появление нормальных трещин Т-ПР и наклонных трещин Т-Н3, которые имеют слабовыраженный характер.

В образце РД-1-2 с величиной пролета среза  $a/h_0=1,0$ , как и в ростверках с пролетом среза, равным 0,5, первыми появились трещины Т-Р в растянутой зоне на торцевых гранях (рис. 3, 5). Величина нагрузки, соответствующая появлению этих трещин, составила 0,25–0,3 от разрушающей. Дальнейшее развитие таких трещин имеет слабую интенсивность, и их рост прекращается при нагрузке, равной 0,45–0,6 от  $P_{\text{разр}}$ .

При величине нагрузки, составляющей 0,37–0,5 от разрушающей, образуются наклонные трещины Т-Н1(2). Траектории таких трещин совпадают с аналогичными трещинами в образце РД-1-3. В дальнейшем ширина раскрытия трещин Т-Н1(2) увеличивалась и к моменту разрушения составила 1–3 мм. При нагрузке 0,8–0,9 от  $P_{\text{разр}}$  отмечается шелушение по краям трещин и обрастание их серией прерывистых наклонных трещин типа Т-Н5.

На боковых гранях ростверка в продольном направлении одновременно с трещинами Т-Н1(2) образуются трещины типа Т-Н3(4) и Т-ПР с моментом появления 0,55–0,6 от разрушающей силы (рис.5). В процессе нагружения отмечался рост трещин Т-Н3(4), которые принимали веерообразную форму распределения над опорными площадками. Как и трещины Т-Н1, трещины Т-Н3 имели серию прерывистых трещин Т-Н5 по своим берегам.



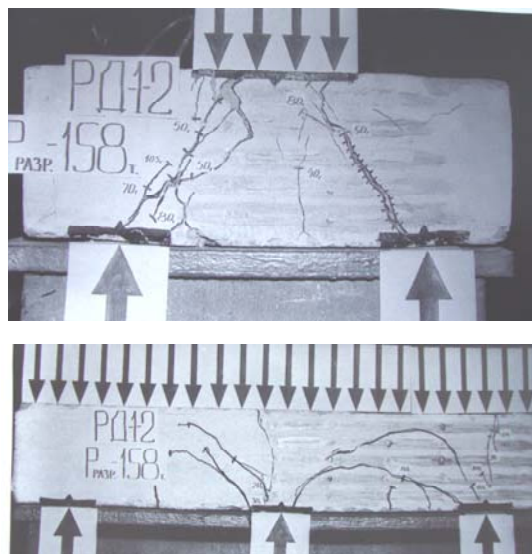


Рис. 5. Характер образования трещин и вид разрушения образца РД-1-2

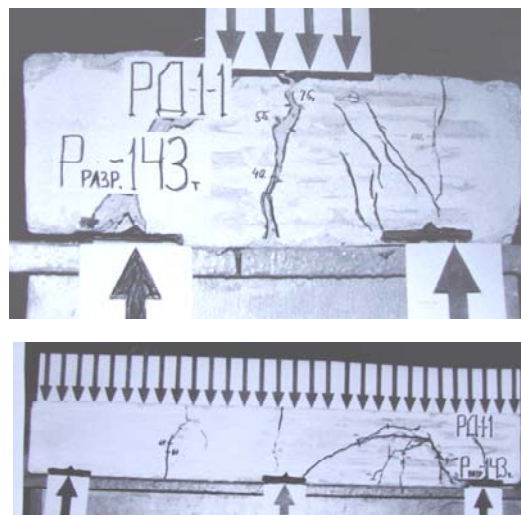


Рис. 6. Характер образования трещин и вид разрушения образца РД-1-1

В образце РД-1-1 с величиной пролета среза  $a/h_0=1,5$ , как и в предыдущих двух, появление первых трещин отмечалось в растянутой зоне в поперечном сечении ростверка – трещины Т-Р (рис.3, 6). Нагрузка начала образования указанных трещин составила 0,25–0,3 от  $P_{\text{разр}}$ . В процессе нагружения трещины Т-Р слабо развивались и при нагрузке 0,4 от разрушающей их рост прекратился.

Затем появляются нормальные трещины типа Т-ПР в продольных пролетах (рис.6). Величина нагрузки к моменту образования данных трещин составляла 0,35–0,4 от  $P_{\text{разр}}$ , а при нагрузке 0,6–0,65 от разрушающей отмечается стабилизация или прекращение их развития.

Характерным для ростверка с пролетом среза  $a/h_0=1,5$  является появление вертикальных трещин Т-ОП у верхней грани ростверка над опорой. Моменту образования этих трещин соответствует величина нагрузки 0,4–0,5 от  $P_{\text{разр}}$ . С увеличением уровня нагружения надопорные трещины практически не развиваются.

При нагрузке, равной примерно 0,4–0,6 от  $P_{\text{разр}}$ , образовывались наклонные трещины Т-Н1(2) и Т-Н3(4) на гранях ростверков. Угол наклона и характер развития этих трещин совпадают с аналогичными в предыдущих образцах. Как и в ростверке с пролетом среза  $a/h_0=1,0$ , в данном образце трещины Т-Н3(4) имеют веерообразный характер распределения. Наклонные трещины активно развивались по длине и ширине и явились критическими при разрушении. Вокруг этих трещин при нагрузке, близкой к разрушающей, отмечается появление мелких прерывистых трещин типа Т-Н5, выделяющих сжатые потоки.

Образец РД-1-3 разрушался при развитии трещин Т-Н1(2) и Т-Н5, то есть происходило разрушение сжатого бетона со смещением краев наклонных трещин. Образец ростверка РД-1-2 разрушался при одновременном развитии наклонных трещин Т-Н1(2) и Т-Н3(4) и серии прерывистых трещин в бетоне Т-Н5. Ширина раскрытия наклонных трещин в момент разрушения составила 0,6–3 мм. Образец РД-1-1 разрушался при одновременном развитии наклонных трещин в поперечном – Т-Н1(2) – и в продольном – Т-Н3(4) – направлении. Ширина раскрытия на момент разрушения составила 1–3,5 мм.

В результате проведенных исследований выявлена особенность работы ростверков, которая заключается в неравномерном распределении сжимающих напряжений по сечению сжатой полосы. Максимальные значения сжимающих напряжений меняют свое положение в зависимости от изменения пролета среза в продольном направлении. Существует отличие в схемах разрушения по условной сжатой полосе бетона при  $a/h_0 < 1,0$  и при  $a/h_0 > 1,0$ . При малых пролетах среза ( $a/h_0 < 1,0$ ) максимальные



значения эпюры сжимающих напряжений располагаются по указанным выше сечениям в поперечном направлении. С ростом пролета среза в продольном направлении ( $a/h_0 > 1,0$ ) максимальные значения напряжений перемещаются по сечению сжатой полосы и становятся максимальными в продольном направлении.

Установлена закономерность изменения разрушающих усилий при изменении шага свай в продольном направлении. Оказалось, что в ростверках с двухрядным расположением свай с увеличением шага в продольном направлении от 0,5 до 1,0 разрушающее усилие возрастает в 1,5 раза. С дальнейшим ростом шага свай от 1,0 до 1,5 наблюдается незначительное снижение разрушающей силы примерно в 1,1 раза. Это связано с изменением напряженно-деформированного состояния при постоянном пролете среза в поперечном направлении, то есть когда пролет среза в продольном направлении меньше пролета среза в поперечном направлении, имеем эффект возрастания разрушающей силы; при равных пролетах среза он исчезает. В тех случаях, когда пролет среза вдоль ростверка превышает пролет среза в поперечном направлении, наступает обратный эффект, то есть снижение разрушающей силы.

Таким образом, разрушение ростверков при  $a/h_0 = 1,0 \dots 1,5$  можно квалифицировать как разрушение бетонного участка от действия главных сжимающих напряжений, ограниченного пространственными трещинами Т-Н1 и Т-Н3 при активном развитии указанных наклонных трещин. При нагрузке, близкой к разрушающей, для наклонных трещин (Т-Н1, Т-Н3) характерно смещение берегов трещин, что свидетельствует о наличии поперечных деформаций в результате действия больших сжимающих напряжений над трещиной [4].

Для ростверков с малой величиной пролета среза ( $a/h_0 = 0,5$ ) критическими оказались только наклонные трещины типа Т-Н1, выделяющие сжатые наклонные участки бетона, заключенные между грузовой полосой и продольным рядом свай, в пределах которых концентрируются максимальные значения главных сжимающих напряжений.

Экспериментально-теоретические исследования ростверков и изучение их НДС продолжаются в настоящее время. Результаты полученных исследований могут послужить основой совершенствования нормативных методов расчета, в том числе альтернативных, прочности ростверков на основе каркасно-стержневого моделирования.

#### Список литературы

1. Корнюхин, А.В. Прочность ростверков свайных фундаментов при двухрядном и шахматном расположении свай: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Корнюхин – Пенза, 1997. – 161 с.
2. Снежкина, О.В. Короткие балки. Моделирование физической работы: моногр. / О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 124 с.
3. Корнюхин, А.В. Экспериментально-теоретические исследования толстых плит: моногр. / А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова, О.В. Снежкина. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 132 с.
4. Скачков, Ю.П. Определение схем разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок по экспериментальным данным / Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3(17).

#### References

1. Kornuhin, A.V. Strength grillage pile foundations with two-row and chess location piles: dis.... kand. tehn. Sciences / A.V. Корнюхин. – Penza, 1997. – 161 с.
2. Snezhkina, O.V. Short beams. Modeling of physical work: monogr. / O.V. Snezhkina, A.V. Kornuhin, M.V. Kochetkova. – Penza, 2011. – 124 p.
3. Kornuhin A.V., Kochetkova M.V., Snezhkina, Experimental and theoretical studies of thick plates: monogr. / A.V. Kornuhin, M.V. Kochetkova, O.V. Snezhkina. – Penza, 2013. – 132 p.
4. Skachkov, Y.P. Definition of failure modes and fissuring short reinforced concrete beams on experimental data / Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, A.V. Kornuhin, M.V. Kochetkova // Regional architecture and construction. – 2013. – № 3(17).

*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

**Кочеткова Майя Владимировна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством  
и технологии строительного производства»  
E-mail: M.V.Kochetkova@mail.ru

**Гусев Николай Иванович**,  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Управление качеством  
и технологии строительного производства»

**Снежкина Ольга Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Паршина Ксения Сергеевна**,  
студентка гр. АРХ-41

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

**Kochetkova Maya Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Quality management and  
technology of building production»  
E-mail: M.V.Kochetkova@mail.ru

**Gusev Nikolai Ivanovich**,  
Candidate of Sciences, Professor of the  
department «Quality management and  
Technology of construction production»

**Snezhkina Olga Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Mathematics and  
mathematical modeling»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Parshina Ksenia Sergeevna**,  
student of group ARH-41

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ РОСТВЕРКОВ

М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев, О.В. Снежкина, К.С. Паршина

Рассмотрена методика экспериментальных исследований работы ростверков: физический эксперимент с использованием силовых установок и численный эксперимент с применением программы «Лира», основанный на методе конечных элементов.

*Ключевые слова: напряжённно-деформированное состояние, физический эксперимент, численный эксперимент, ростверки.*

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF GRILLAGES WORK

M.V. Kochetkova, N.I. Gusev, O.V. Snezhkina, K.S. Parshina

The article concerns the methods of grillages work experimental research, namely physical experiment using propulsions and numerical experiment using the program «Lear» based on the finite element method.

*Keywords: stress-strain state, physical experiment, grillages.*

Целью экспериментальных исследований ростверков является получение информации о напряжённно-деформированном состоянии. Наиболее перспективными методами являются физический эксперимент натурных или масштабных образцов с применением силовых установок и различных приборов, определяющих напряжения и деформации, и применение численных экспериментов на основе метода конечных элементов, который является универсальным и тоже даёт возможность определить распределение напряжений и деформаций в различных конструкциях. Наиболее достоверные значения прочности можно получить на основе физических экспериментов.

Для физического эксперимента опытные образцы проектировались в виде моделей в масштабе 1:3. Предварительные исследования многорядных ростверков под колонны, опирающиеся на сваи-стойки, показали, что крайние сваи менее нагружены, чем средние сваи вблизи колонны. Поэтому в эксперименте сваи-стойки имитировались трубами, деформации которых измерялись.

На рис. 1 представлена схема силовой установки для испытаний ростверков под колонны при многорядном расположении свай. Силовая установка представляла собой две металлические рамы, состоящие из боковых стоек, закрепленных в ручьях силового пола, и поперечных балок-траверс, жестко соединенных со стойками. Нагружение ростверков производили гидравлическим домкратом ДГ-200 через металлическую пластину, имитирующую колонну. Опоры устанавливались с помощью регулировочных винтов, над которыми между двумя пластинами, по размеру соответствующими поперечному сечению сваи 100 мм, в вертикальном направлении были поставлены трубы длиной 100 мм, толщиной 4 мм и диаметром 89 мм.

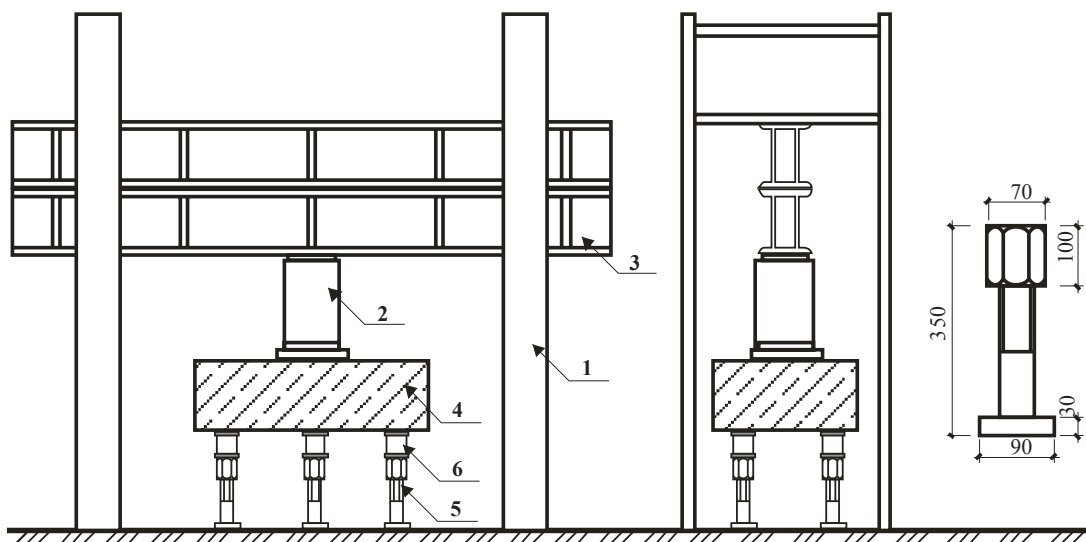


Рис. 1. Схема силовой установки для испытаний многорядных свайных ростверков под колонны:

1 – металлическая рама; 2 – гидравлический домкрат ДГ – 200; 3 – система распределительных траверс; 4 – испытываемый образец; 5 – винтовая опора; 6 – металлическая труба

При нагружении образца под действием сжимающих усилий трубы упруго деформировались. Деформации труб были измерены с помощью индикаторов (пластины были подготовлены специальным образом, чтобы можно было на их углах установить индикаторы часового типа) и тензодатчиков (на каждую трубу было наклеено по 4 тензодатчика с базой 20 мм, снятие показаний с датчиков осуществляли прибором АИД-4).

При подготовке и в процессе испытаний проводилась зачистка и побелка поверхности бетона образцов для визуального наблюдения за образованием и развитием трещин. Тензодатчики наклеивали на бетонное поле и нижние стержни продольной арматуры (рис. 2). Нагружение производилось поэтапно, на 5–10 % от предполагаемой разрушающей нагрузки.

Схемы приложения нагрузок показаны на рис. 3.

С помощью численных экспериментов целесообразнее исследовать ростверки натуральных размеров. Рассмотрены варианты ростверков при постоянном шаге свай в поперечном направлении 1200 мм, при постоянной высоте ростверка 900 мм и поперечном сечении свай 300×300 мм. В продольном направлении расстояние между осями свай менялось и принималось равным 900, 1200, 1500 мм. Расчётные схемы ростверков определялись путём представления объёма ростверка в виде конечных элементов размером 100×200 мм и 150×200 мм. Ростверк является симметричной конструкцией относительно двух центральных осей, поэтому с центральным приложением нагрузки в расчёт принимали четвертую часть фундамента, а с внецентренным приложением нагрузки – половину фундамента. Отброшенную часть фундамента в расчётной схеме учитывали введением связи в каждом конечном элементе. Для каж-

дого образца были получены величины нормальных касательных напряжений в центре тяжести каждого объемного элемента и главные напряжения. Для анализа напряженно-деформированного состояния ростверков построены эпюры, отражающие характер их работы.

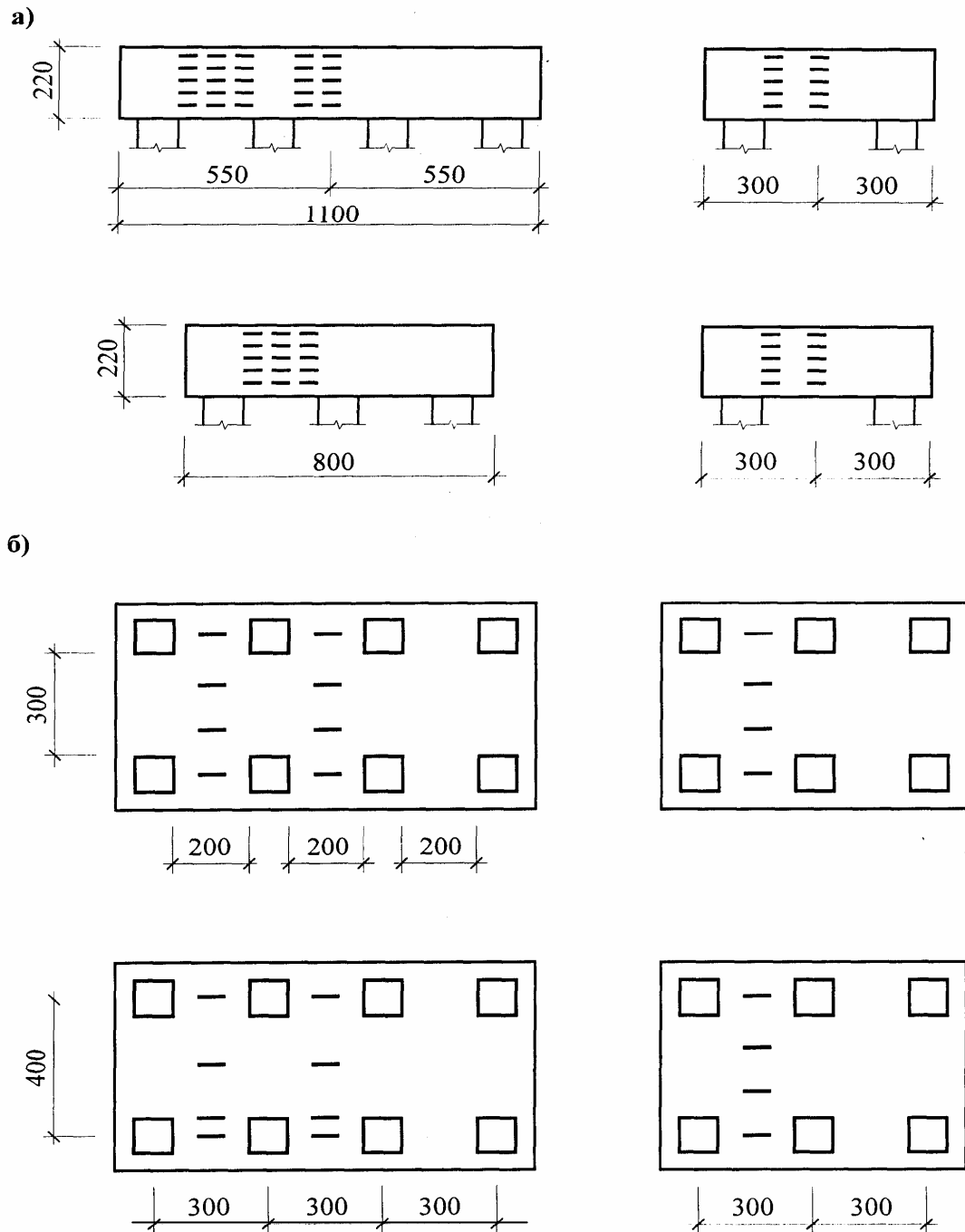


Рис. 2. Схемы расположения тензодатчиков на бетоне (а), на арматуре (б)

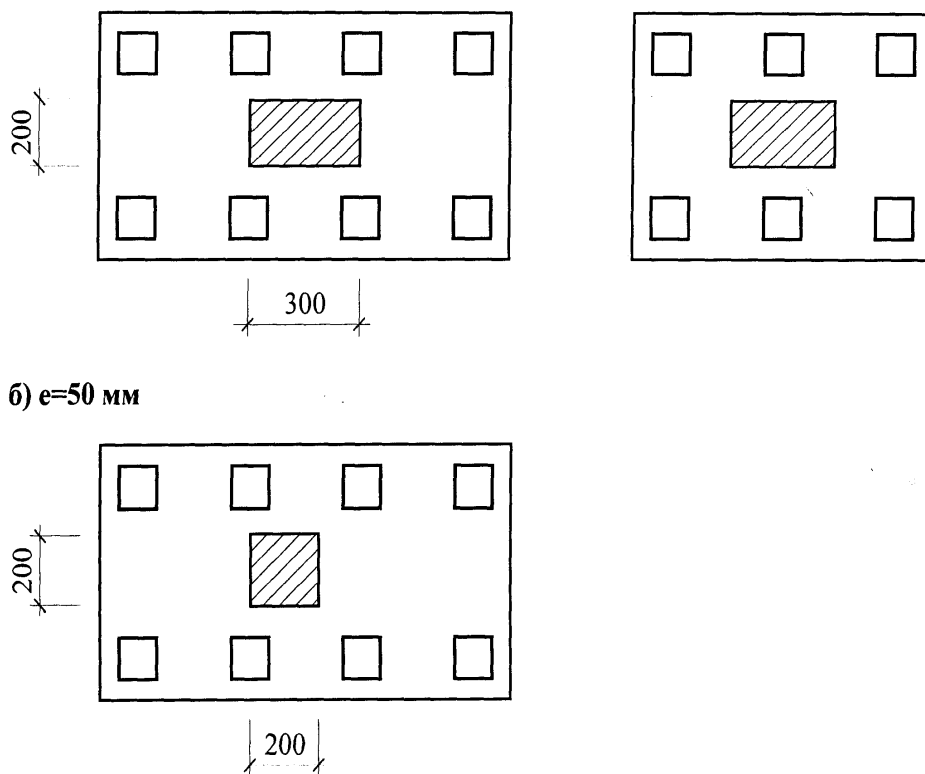


Рис. 3. Схемы приложения нагрузки

Анализ напряжённо-деформированного состояния ростверков на основе физического и численного экспериментов позволяет разработать методы расчёта и конструирования ростверков с учётом изменения исследуемых факторов: схем расположения свай с изменением их количества; шага свай в продольном и поперечном направлениях; размеров опор; высоты ростверка; схемы армирования ростверков по растянутой зоне; процента армирования продольной растянутой арматуры.

Исследования физических моделей остаются наиболее надёжным способом выявления характера образования и развития трещин, схемы разрушения, характера распределения деформаций (напряжений), закономерности изменения разрушающих усилий и усилий образования трещин при изменении различных факторов. Но и современные компьютерные программы позволяют проследить процесс появления и развития трещин. Однако компьютерные модели, основанные на классических теориях пластичности, не могут учесть всю специфику деформирования железобетона, реальные физико-механические процессы, протекающие при деформировании твёрдого тела.

Рассмотренные методики физического и численного экспериментов неоднократно применялись для оценки работы многорядных свайных ростверков под колонны.

Особенностями напряжённо-деформированного состояния ростверков под колонну при многорядном расположении свай являются уменьшение значений напряжений над опорами-сваями по мере удаления их от оси колонны с одновременным уменьшением рабочей площади свай-опор, а также пространственная ориентация участков ростверка, в пределах которых концентрируются главные сжимающие и растягивающие напряжения.

#### Список литературы

1. Снежкина, О.В. Короткие балки. Моделирование физической работы / О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 122 с.
2. Корнюхин, А.В. Экспериментально-теоретические исследования толстых плит / А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова, О.В. Снежкина. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 131 с.

3. Кочеткова, М.В. Совершенствование методов расчёта многорядных свайных ростверков под колонны / М.В. Кочеткова, О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 139 с.
4. Корнюхин, А.В. Напряжённо-деформированное состояние и моделирование работы ленточных ростверков при двухрядном и шахматном расположении свай / А.В. Корнюхин, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 124 с.
5. Скачков, Ю.П. Определение схем разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок по экспериментальным данным / Ю.П.Скачков, О.В.Снежкина, М.В.Кочеткова, А.В.Корнюхин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3 (17).
6. Кочеткова, М.В. Экспериментально-теоретический подход к расчёту ростверков свайных фундаментов под колонны / М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №3 (14).

#### References

1. Snezhkina, O.V. Short beams. Simulation of physical work / O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornyuhin. – Penza: PGUAS, 2011. – 122 p.
2. Kornyuhin, A.V. Experimental and theoretical studies of thick plates / A.V. Kornyuhin, M.V. Kochetkova, O.V. Snezhkina. – Penza: PGUAS, 2013. – 131 p.
3. Kochetkova, M.V. Improving methods of calculation pile foundations under columns / M.V. Kochetkova, O.V. Snezhkina, A.V. Kornyuhin. – Penza: PGUAS, 2011. – 139 p.
4. Kornyuhin, A.V. Stress-strain state and modeling of tape grillages / A.V. Kornyuhin, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova. – Penza: PGUAS, 2011. – 124 p.
5. Skachkov, Y.P. Identification of patterns of destruction and cracking short reinforced concrete beams based on experimental data / Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornyuhin // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3 (17).
6. Kochetkova, M.V. Experimental-theoretical approach to the calculation of grillages pile foundations under columns / M.V. Kochetkova, N.I. Gusev // Regional architecture and engineering. – 2012. – №3 (14).

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Бакушев Сергей Васильевич,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Механика»  
E-mail: tim-graf\_penza@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Bakushev Sergey Vasilevich,**  
Doktor of Sciences,  
Professor of the Department «Mechanic»  
E-mail: tim-graf\_penza@rambler.ru

## ПЛОСКАЯ ЗАДАЧА ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ – РЕШЕНИЕ В НАПРЯЖЕНИЯХ

С.В. Бакушев

Рассматривается задача построения физически нелинейного аналога бигармонического уравнения для случая обобщённого плоского напряжённого состояния сплошной среды, механическое поведение которой описывается произвольными перекрёстными зависимостями между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций. Показано, что функция напряжений в виде полинома второго порядка будет удовлетворять физически нелинейному аналогу бигармонического уравнения, если коэффициенты функции напряжений не являются независимыми.

*Ключевые слова: физическая нелинейность, плоская задача, функция напряжений.*

## PLAIN TASK OF PHYSICALLY NON-LINEAR THEORY OF ELASTICITY – SOLUTION IN STRESSES

S.V. Bakushev

The task of making physically non-linear analog of bi-harmonic equation for the case of generalized plain strained state of continuum, mechanical behavior of which is described by arbitrary cross dependencies between the first tensor invariants and second invariants of deviators of stresses and strains. It is shown that the function of stress in form of polynomial of second order will satisfy physically non-linear analog of bi-harmonic equation if stress function coefficients are not independent.

*Keywords: physical non-linearity, plain task, the stress function.*

Вопросы построения разрешающих уравнений физически нелинейной теории упругости в напряжениях в общем случае трёхмерного тела при произвольных перекрёстных зависимостях между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций рассматривались в работе [1]. Достаточно подробно этот вопрос изложен в монографии Г. Каудерера [2], где для случая обобщённого плоского напряжённого состояния построен физически нелинейный аналог бигармонического уравнения. При этом механическое поведение сплошной среды описывается математической моделью, в которой объёмное деформирование является функцией только среднего напряжения, а сдвиговое деформирование зависит только от сдвиговых напряжений. В данной работе рассматривается построение разрешающих уравнений физически нелинейной теории упругости в напряжениях для случая плоской задачи, в частности для случая обобщённого плоского напряжённого состояния при произвольных перекрёстных зависимостях между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций.

Будем полагать, что механическое поведение сплошной среды описывается математической моделью, учитывающей произвольные перекрёстные зависимости

между первыми инвариантами тензоров  $\sigma$  и  $\varepsilon$  и вторыми инвариантами девиаторов  $\Gamma$  и  $\Gamma$  напряжений и деформаций:

$$\sigma = 3K(\varepsilon, \Gamma)\varepsilon; \quad \Gamma = G(\varepsilon, \Gamma)\Gamma. \quad (1)$$

Здесь  $K(\varepsilon, \Gamma)$  – модуль объёмного расширения (сжатия);  $G(\varepsilon, \Gamma)$  – модуль сдвига, причём для случая обобщённого плоского напряжённого состояния

$$\sigma = \sigma_x + \sigma_y; \quad \varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z;$$

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}; \quad (2)$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2}\gamma_{xy}^2}.$$

Физические соотношения при этом получают вид:

$$\varepsilon_x = a\sigma_x + b\sigma_y; \quad \varepsilon_y = a\sigma_y + b\sigma_x; \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}. \quad (3)$$

Здесь

$$a = \frac{3K + G}{9KG}; \quad b = \frac{2G - 3K}{18KG}. \quad (4)$$

Поскольку и модуль объёмного расширения (сжатия)  $K$ , и модуль сдвига  $G$  могут быть представлены и как функции инвариантов тензора деформации  $\varepsilon$  и  $\Gamma$ , то есть  $K = K(\varepsilon, \Gamma)$ ,  $G = G(\varepsilon, \Gamma)$ , и как функции инвариантов тензора напряжений  $\sigma$  и  $\Gamma$ , то есть  $K = K(\sigma, \Gamma)$ ,  $G = G(\sigma, \Gamma)$ , то в дальнейшем будем полагать, что модули объёмного расширения (сжатия) и сдвига являются функциями инвариантов тензора напряжений:

$$K = K(\sigma, \Gamma), \quad G = G(\sigma, \Gamma). \quad (5)$$

Ввиду этого коэффициенты

$$a = a(\sigma, \Gamma), \quad b = b(\sigma, \Gamma). \quad (6)$$

Подставляя физические соотношения (3) в уравнение неразрывности деформаций

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (7)$$

и учитывая уравнения равновесия при постоянных объёмных силах  $F_x = \text{const}$ ,  $F_y = \text{const}$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x = 0, \quad \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + F_y = 0, \quad (8)$$

получим уравнение неразрывности деформаций для физически нелинейной модели сплошной среды, записанное в напряжениях:

$$\nabla^2 (\sigma_x + \sigma_y) = \left( \frac{1}{G^2} \frac{\partial G}{\partial x} - 2 \frac{\partial b}{\partial x} \right) \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \left( \frac{1}{G^2} \frac{\partial G}{\partial y} - 2 \frac{\partial b}{\partial y} \right) \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - 2 \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} - 2 \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} -$$

$$- \left( \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} \right) \sigma_x - \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} \right) \sigma_y - \frac{1}{G^2} \left( \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial y} - \frac{2}{G} \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} \right) \tau_{xy}. \quad (9)$$



Здесь  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – гармонический оператор.

В правой части уравнения (9), с учётом зависимостей (6), производные определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial x} &= \frac{\partial a}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}; & \frac{\partial a}{\partial y} &= \frac{\partial a}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}; \\ \frac{\partial b}{\partial x} &= \frac{\partial b}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial b}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}; & \frac{\partial b}{\partial y} &= \frac{\partial b}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \frac{\partial b}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}; \\ \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 a}{\partial \sigma^2} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 a}{\partial \sigma \partial T} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial \sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} + \frac{\partial a}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 a}{\partial \sigma^2} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 a}{\partial \sigma \partial T} \frac{\partial \sigma}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial \sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} + \frac{\partial a}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}; \\ \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 b}{\partial \sigma^2} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^2 b}{\partial T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 b}{\partial \sigma \partial T} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial b}{\partial \sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} + \frac{\partial b}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 b}{\partial \sigma^2} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial^2 b}{\partial T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 b}{\partial \sigma \partial T} \frac{\partial \sigma}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial b}{\partial \sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} + \frac{\partial b}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}; \\ \frac{\partial G}{\partial x} &= \frac{\partial G}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}; & \frac{\partial G}{\partial y} &= \frac{\partial G}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}; \\ \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial^2 G}{\partial \sigma^2} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \frac{\partial^2 G}{\partial T^2} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} + \\ &+ \frac{\partial^2 G}{\partial \sigma \partial T} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial \sigma}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial G}{\partial \sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x \partial y} + \frac{\partial G}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (10)$$

В формулах (10), в соответствии с зависимостями (2), будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial x}; & \frac{\partial \sigma}{\partial y} &= \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y}; \\ \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2}; & \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2}; & \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x \partial y}; \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{1}{6T} \left[ 2 \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \right) - \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right) + 6\tau_{xy} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right]; \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{1}{6T} \left[ 2 \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) - \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \right) + 6\tau_{xy} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right]; \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{1}{6T} \left[ 2 \left( \sigma_x \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \right) - \right. \\ &- \left. \left( \sigma_x \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right) + 6\tau_{xy} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x^2} + 6 \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right] - \\ &- \frac{1}{6T^2} \left[ 2 \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \right) - \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right) + 6\tau_{xy} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right] \frac{\partial T}{\partial x}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y^2} &= \frac{1}{6T} \left[ 2 \left( \sigma_x \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial y^2} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} + \sigma_y \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) - \right. \\ &- \left. \left( \sigma_x \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \sigma_y \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial y^2} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \right) + 6\tau_{xy} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y^2} + 6 \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right] - \\ &- \frac{1}{6T^2} \left[ 2 \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) - \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \right) + 6\tau_{xy} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right] \frac{\partial \Gamma}{\partial y}; \\ \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x \partial y} &= \frac{1}{6T} \left[ 2 \left( \sigma_x \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \right) - \right. \\ &- \left. \left( \sigma_x \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right) + 6\tau_{xy} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} + 6 \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right] - \\ &- \frac{1}{6T^2} \left[ 2 \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \right) - \left( \sigma_x \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right) + 6\tau_{xy} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right] \frac{\partial \Gamma}{\partial y}. \end{aligned}$$

Введя обычным образом функцию напряжений  $\varphi = \varphi(x, y)$  так, что

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \quad (12)$$

(при этом уравнения равновесия (8) удовлетворяются тождественно), и подставив формулы (12) в уравнение неразрывности деформаций (9), получим физически нелинейный аналог бигармонического уравнения. Вполне понятно, что в отличие от физически линейной модели сплошной среды, где бигармоническое уравнение является однородным, аналог бигармонического уравнения для физически нелинейной сплошной среды является неоднородным. Вид правой части уравнения (9) существенно определяется видом рассматриваемой математической модели (5) сплошной среды.

Для модели сплошной среды, описываемой зависимостями

$$K = K_0 = \text{const}, \quad G = G_0 = \text{const}, \quad (13)$$

уравнение (9) приводится к виду:

$$\nabla^2 (\sigma_x + \sigma_y) = 0, \quad (14)$$

то есть совпадает с уравнением Леви линейной теории упругости.

Рассмотрим сплошную среду, математическая модель которой соответствует, вообще говоря, теории малых упругопластических деформаций [3] и описывается соотношениями:

$$K = K_0 = \text{const}, \quad G = G(T). \quad (15)$$

При этом

$$a = a(T), \quad b = b(T); \quad (16)$$

формулы (10) приводятся к зависимостям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial x} &= \frac{\partial a}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \frac{\partial a}{\partial y} = \frac{\partial a}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad \frac{\partial b}{\partial x} = \frac{\partial b}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \frac{\partial b}{\partial y} = \frac{\partial b}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}, \\ \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial a}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial a}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 b}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 b}{\partial T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial b}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 b}{\partial T^2} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial b}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{\partial G}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial G}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 G}{\partial T^2} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y},$$

причём, как это следует из формул (4),

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial T} &= -\frac{1}{3G^2} \frac{\partial G}{\partial T}; & \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} &= -\frac{1}{3G^3} \left[ G \frac{\partial^2 G}{\partial T^2} - 2 \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)^2 \right]; \\ \frac{\partial b}{\partial T} &= \frac{1}{6G^2} \frac{\partial G}{\partial T}; & \frac{\partial^2 b}{\partial T^2} &= \frac{1}{6G^3} \left[ G \frac{\partial^2 G}{\partial T^2} - 2 \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, для записи полной системы расчётных соотношений при построении физически нелинейного аналога бигармонического уравнения (9) для теории малых упругопластических деформаций необходимо определить первую и вторую производные в формулах (18) от модуля сдвига  $G(T)$  по интенсивности касательных напряжений  $T$ .

Конкретизируя математическую модель (15), запишем деформационные зависимости в следующем виде:

$$\sigma = K_0 \varepsilon, \quad T = G_0 \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) \Gamma. \quad (19)$$

Здесь  $K_0$  – начальный модуль объёмного расширения (сжатия);  $G_0$  – начальный модуль сдвига при чистом сдвиге;  $\Gamma_s$  – предельная интенсивность деформаций сдвига.

Обращая соотношение (19<sub>2</sub>), выразим деформации через напряжения:

$$\Gamma = \left( \frac{\Gamma_s}{T} - \sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)} \right) T.$$

Таким образом, модуль сдвига, как функция интенсивности касательных напряжений, будет определяться соотношением

$$G(T) = \frac{1}{\frac{\Gamma_s}{T} - \sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)}}. \quad (20)$$

Далее, используя соотношение (20), найдём производные, входящие в формулы (18):

$$\frac{\partial G}{\partial T} = \frac{\frac{\Gamma_s}{T^2}}{\left[ \frac{\Gamma_s}{T} - \sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)} \right]^2} \left[ 1 + \frac{\frac{1}{G_0} - \frac{\Gamma_s}{T}}{\sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)}} \right]; \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 G}{\partial T^2} = & \frac{1}{\left[ \frac{\Gamma_s}{T} - \sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)} \right]^4} \left[ 1 + \frac{\frac{1}{G_0} - \frac{\Gamma_s}{T}}{\sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)}} \right] \times \\
 & \times \left\{ -2 \frac{\Gamma_s}{T^3} \left[ \frac{\Gamma_s}{T} - \sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)} \right]^2 + 2 \frac{\Gamma_s^2}{T^4} \left[ \frac{\Gamma_s}{T} - \sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)} \right] \right\} \times \\
 & \times \left[ 1 + \frac{\frac{1}{G_0} - \frac{\Gamma_s}{T}}{\sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)}} \right] + \frac{\frac{\Gamma_s^2}{T^4}}{\left[ \frac{\Gamma_s}{T} - \sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)} \right]^2 \left[ \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right) \right]} \times \\
 & \times \left[ \sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)} - \frac{\frac{1}{G_0} - \frac{\Gamma_s}{T}}{\sqrt{\left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)^2 - \frac{2}{G_0} \left( \frac{\Gamma_s}{T} \right)}} \right]. \tag{22}
 \end{aligned}$$

Покажем, что функция  $\varphi = \varphi(x, y)$ , заданная в виде полинома второго порядка, будет удовлетворять физически нелинейному аналогу бигармонического уравнения (9) для сплошной среды, описываемой математической моделью (19) в условиях обобщённого плоского напряжённого состояния. Итак, пусть

$$\varphi(x, y) = \frac{a_2}{2} x^2 + b_2 xy + \frac{c_2}{2} y^2. \tag{23}$$

При этом 
$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = c_2; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = a_2; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} = -b_2; \tag{24}$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{c_2^2 + a_2^2 - a_2 c_2 + 3b_2^2}. \tag{25}$$

Так как функция (23) обращает левую часть уравнения (9) в нуль, то уравнение (9), после подстановки в него функции (23), будет устанавливать функциональную связь между коэффициентами  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$ . Пусть эта связь имеет вид:

$$c_2 = f(a_2, b_2). \tag{26}$$

Поскольку величина интенсивности касательных напряжений  $T$  определяет уровень напряжённого состояния в точке, то, учитывая соотношение (25) и вид правой части уравнения (9), следует ожидать, что функциональная зависимость (26) для различных уровней напряжённого состояния будет разной. В силу зависимости (26), функция (23) будет удовлетворять уравнению (9).

Для определения коэффициентов  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$  необходимо воспользоваться условиями на поверхности тела. Из вышесказанного следует, что нагрузка на поверхности

тела не может быть произвольной; в любом случае должно удовлетворяться соотношение (26).

*Заключение.* Полученные результаты могут быть использованы при решении плоской задачи теории нелинейной упругости для случая плоского напряжённого состояния в напряжениях.

#### Список литературы

1. Бакушев, С.В. Уравнения физически нелинейной теории упругости в напряжениях / С.В. Бакушев // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №1(12). – С.117–123.
2. Каудерер, Г. Нелинейная механика / Г. Каудерер. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1961. – 778 с.
3. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин. – М.: ОГИЗ, 1948. – 377 с.

#### References

1. Bakushev, S.V. Equations of physically non-linear theory of elasticity // Regional architecture and construction / S.V. Bakushev. – 2011. – №1 (12). – P. 117–123.
2. Kauderer, Dr. Hans. Non-linear Mechanics / Dr. Hans. Kauderer. – M.: IZD-vo foreign lit. 1961. – 778 p.
3. Ilyushin, A.A. Plasticity / A.A. Ilyushin. – M.:OGIZ, 1948. – 377 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

**Шеин Александр Иванович,**  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой «Механика»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Астраханский инженерно-строительный  
институт

Россия, 414056, г. Астрахань,  
ул. Татишева, д. 18,  
тел.: 8-8512-49-42-20

**Завьялова Ольга Борисовна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
декан Строительного факультета  
E-mail: zavyalova\_ob@aucu.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

**Shein Alexander Ivanovich,**  
Doktor of Sciences, Professor,  
Head of the Department «Mechanic»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Astrakhan Civil Engineering Institute

Russia, 414056, Astrakhan, 18, Tatisheva St.,  
tel.: 8-8512-49-42-20

**Zavyalova Olga Borisovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
dean of Construction faculty  
E-mail: zavyalova\_ob@aucu.ru

## ПРИБЛИЖЁННЫЙ СПОСОБ РАСЧЁТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОЭТАЖНЫХ РАМ

А.И. Шеин, О.Б. Завьялова

Предлагается приближенный метод расчета многоэтажных рам на устойчивость. Метод базируется на сведении рамной системы к одной стойке и конечно-разностном расчете упрощенной расчетной схемы.

*Ключевые слова: многоэтажные рамы, устойчивость, конечно-разностная аппроксимация, приближенный расчет.*

## APPROXIMATE METHOD OF CALCULATION MULTISTOREY FRAMES ON STABILITY

A.I. Shein, O.B. Zavialova

Approximate method of calculation multistorey frames on stability is offered. The method is based on the reduction of the frame to a rack and finite difference calculation of the simplified calculation scheme.

*Keywords: multistory frame, stability, finite difference approximation, an approximate calculation.*

Современные программные комплексы позволяют рассчитать любые здания, в том числе отличающиеся сложной конструктивной схемой. От расчетчика требуется, по сути, правильно составить расчётную схему и выполнить ввод её в программу. При этом достаточно велика вероятность ошибки на любом этапе формирования расчетной схемы, особенно для сложных или объёмных задач, когда точность результатов компьютерного расчета может вызывать сомнения. Чтобы оценить достоверность такого расчета, необходимо воспользоваться достаточно простой приближенной проверкой полученных результатов. При выполнении расчёта отдельных рам или рамных систем на общую устойчивость такую проверку поможет произвести модель «эквивалентного» стержня. Здесь уместно процитировать одно из рекомендательных указаний Свода правил [1, п. 11.3.6]: «При соотношении  $H/B > 6$  (где  $H$  – полная высота многоэтажной рамы,  $B$  – ширина рамы) должна быть проверена общая устойчивость рамы в целом как составного стержня, защемленного в основании и свободного вверху».

С учетом того, что многоэтажные рамы обычно разделяют на несколько уровней, различающихся размерами поперечного сечения колонн, упрощенная модель также должна иметь по высоте переменную жёсткость, дискретно возрастающую к основа-

нию. Для приближенного расчета устойчивости стержня с переменными жесткостными параметрами будем использовать метод конечных разностей (МКР). Предположим, что требуется проверить устойчивость многоэтажной регулярной рамы, у которой на всех этажах сечения ригелей одинаковы, а стойки разделены на  $n$  уровней одинаковой высоты. В пределах одного уровня стойки могут иметь различные сечения, обусловленные приходящейся на них грузовой площадью. Заменяем раму защемленным в основании стержнем, имеющим переменную изгибную и сдвиговую жесткость (рис. 1).

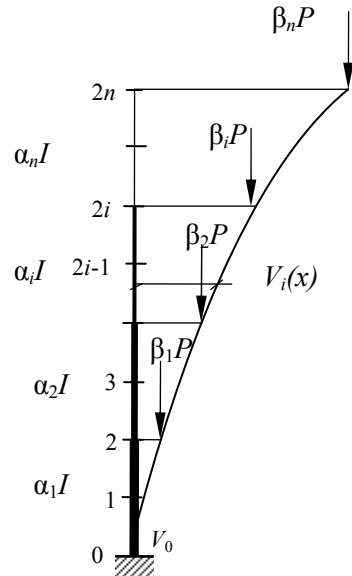


Рис.1. Замена рамы условным стержнем

Изгибную жесткость условного стержня на каждом уровне вычислим по формуле

$$EI_{\text{усл}} = E \times \sum (A_i \times r_i^2 + I_{oi}), \quad (1)$$

а сдвиговую жесткость – по выражению

$$GA_{\text{усл}} = \ell / \delta, \quad (2)$$

где  $\ell$  – высота этажа;  $\delta$  – средняя податливость ячейки рамы от сдвига, определяемая по формулы (3)-(5) [3]:

➤ для однопролетной рамы:

$$\delta = \ell^2 / 12 \times [(1/s + 1/r) \times (n - 2) + 7/3s + 17/18r] / n; \quad (3)$$

➤ для двухпролётной рамы

$$\delta = \ell^2 / 12 \times [(1/s + 1/r) \times (n - 2) + 7/3s + 34/27r] / n; \quad (4)$$

➤ для рамы, имеющей  $p$  пролётов,  $p \geq 3$ :

$$\delta = \ell^2 / 12 \times [(1/s + 1/r) \times (n - 2) + 7/3s + (8,6p + 5,6)/r] / n, \quad (5)$$

где  $n$  – число этажей,  $n \geq 2$ ;  $\ell$  – высота этажа.

Примем, что изгибные жесткости участков равны:  $\alpha_1 EI$ ;  $EI_2 = \alpha_2 EI$ ; ...;  $EI_n = \alpha_n EI$ .

Для границ участков, согласно [2], будем учитывать среднюю жесткость примыкающих уровней, например: для границы 1-го и 2-го участков  $\alpha_{1,2} = (\alpha_1 + \alpha_2) / 2$ .

Нагрузки на уровни выразим через величину  $P$ :  $P_1 = \beta_1 P$ ;  $P_2 = \beta_2 P$ ; ...;  $P_n = \beta_n P$ . На каждом участке учитываем по два сечения. Шаг сечений  $\Delta$  равен половине высоты уровня.

Определим вначале критические нагрузки без учёта деформаций сдвига. Дифференциальные уравнения равновесия каждого участка в отклонённом состоянии заменим уравнениями в конечных разностях. Таким образом, составим систему однородных уравнений. Приравняв её определитель нулю, получим критические нагрузки.

Дифференциальное уравнение равновесия для  $i$ -го участка:

$$y_i''(x) + \frac{P}{\alpha_i EI} \left[ \beta_i (V_i(x) - V_{2i}) + \beta_{i+1} (V_i(x) - V_{2(i+1)}) + \dots + \beta_n (V_i(x) - V_{2n}) \right] = 0. \quad (6)$$

Уравнения в конечных разностях для точек  $i$ -го участка:

➤ точка  $2i-1$  (середина участка):

$$\frac{V_{2i-2} - 2V_{2i-1} + V_{2i}}{\Delta^2} + \frac{P}{\alpha_i EI} \left[ \beta_i (V_{2i-1} - V_{2i}) + \dots + \beta_n (V_{2i-1} - V_{2n}) \right] = 0, \quad (7)$$

➤ точка  $2i$  (верхняя граница участка):

$$\frac{V_{2i-1} - 2V_{2i} + V_{2i+1}}{\Delta^2} + \frac{P}{\alpha_{i,i+1} EI} \left[ \beta_{i+1} (V_{2i} - V_{2(i+1)}) + \dots + \beta_n (V_{2i} - V_{2n}) \right] = 0. \quad (8)$$

Выполним замену:  $\frac{P}{EI} = k^2$ ,  $k^2 \Delta^2 = c$  и составим определитель системы уравнений

порядка  $2n \times 2n$  в конечных разностях:

$$|A| = \begin{vmatrix} 2 & \frac{\beta_1 c}{\alpha_1} & 0 & \frac{\beta_2 c}{\alpha_1} & 0 & \frac{\beta_3 c}{\alpha_1} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_1} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_1} \\ \frac{c(\beta_1 + \beta_n)}{\alpha_1} - 2 & 1 - \frac{\beta_1 c}{\alpha_1} & 0 & \frac{\beta_2 c}{\alpha_1} & 0 & \frac{\beta_3 c}{\alpha_1} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_1} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_1} \\ 1 & \frac{c(\beta_2 + \beta_n)}{\alpha_{1,2}} - 2 & 1 & \frac{\beta_2 c}{\alpha_{1,2}} & 0 & \frac{\beta_3 c}{\alpha_{1,2}} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_{1,2}} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_{1,2}} \\ 0 & 1 & \frac{c(\beta_3 + \beta_n)}{\alpha_2} - 2 & 1 - \frac{\beta_2 c}{\alpha_2} & 0 & \frac{\beta_3 c}{\alpha_2} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_2} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_2} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c(\beta_3 + \beta_n)}{\alpha_{2,3}} - 2 & 1 & \frac{\beta_3 c}{\alpha_{2,3}} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_{2,3}} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_{2,3}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{c(\beta_3 + \beta_n)}{\alpha_3} - 2 & 1 - \frac{\beta_3 c}{\alpha_3} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_3} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 1 & \frac{c(\beta_1 + \beta_n)}{\alpha_4} - 2 & 1 - \frac{\beta_1 c}{\alpha_4} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_4} & \dots & \frac{\beta_n c}{\alpha_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{c\beta_n}{\alpha_n} - 2 & 1 - \frac{\beta_n c}{\alpha_n} \end{vmatrix} = 0. \quad (9)$$

Несмотря на кажущуюся трудоёмкость использования полученного определителя, вычисление критических сил не представляет особой сложности. Предположим, требуется определить критическую силу Эйлера для двухуровневой рамы при соотношении изгибных жёсткостей нижнего и верхнего уровней 2:1 и равных силах  $P_1$  и  $P_2$ . Имеем:  $\alpha_1 = 2$ ,  $\alpha_2 = 1$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 1$ .

Определитель (9) из коэффициентов при неизвестных примет вид:

$$|A| = \begin{vmatrix} 2 & -\frac{c}{2} & 0 & -\frac{c}{2} \\ c-2 & 1-\frac{c}{2} & 0 & -\frac{c}{2} \\ 1 & \frac{2c}{3}-2 & 1 & -\frac{2c}{3} \\ 0 & 1 & c-2 & 1-c \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$



Приравняв определитель нулю, получим наименьшее значение  $c = 0,23017$ . Если  $c = k^2 \Delta^2$ , то  $k^2 = c/\Delta^2 = P/EI$ , при  $\Delta^2 = \left(\frac{l}{4}\right)^2$  найдём:

$$P_{кр} = \frac{cEI}{\Delta^2} = \frac{0,23017EI}{\Delta^2} = \frac{3,683EI}{l^2}.$$

Точное решение для такого случая  $P_{кр} = \frac{3,651EI}{l^2}$ , погрешность составила 0,9 %.

При той же нагрузке и одинаковой жёсткости уровней ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ) наименьшее значение  $c = 0,1281$ ,

$$P_{кр} = \frac{cEI}{\Delta^2} = \frac{0,1281EI}{\Delta^2} = \frac{2,05EI}{l^2}.$$

Точное решение в этом случае  $P_{кр} = \frac{2,067EI}{l^2}$ , погрешность составила 0,8 %.

Примем соотношение нагрузок  $P_1 / P_2 = 3$ . Получим из определителя (5) при  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ,  $\beta_1 = 3$ ,  $\beta_2 = 1$  наименьшее значение  $c = 0,09355$ , откуда  $P_{кр} = \frac{1,497EI}{l^2}$ , точное

решение найдём в [5]:  $P_{кр} = \frac{1,515EI}{l^2}$ , погрешность составила 1,2 %.

Для стержня, заменяющего 3-ярусную раму, при  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$  (постоянная жёсткость) и  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1$  (силы равны) получим: наименьшее решение определителя  $c = 0,04629$ ;  $\Delta = l/6$ ,  $k^2 = c/\Delta^2 = 36c/l^2 = P/EI$ , критическая сила  $P_{кр} = \frac{1,667EI}{l^2}$ .

Следует отметить, что для всех рассмотренных примеров двух- и трёхъярусных рам определение критических нагрузок было выполнено без учёта сдвига. Нашей целью здесь было составить простые выражения в виде определителей для вычисления критической силы Эйлера, позволяющие тем не менее получать результаты высокой точности. Учёт деформаций сдвига можно затем производить по формуле, предложенной Энгессером [6] (применяемой в стадии упругой работы материала):

$$P_{кр} = P^Э \cdot \frac{1}{1 + \frac{k}{GA} \cdot P^Э}, \quad (11)$$

где  $P^Э$  – критическая сила Эйлера;  $k$  – коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения. Этот коэффициент был получен авторами в результате многочисленных расчётов на устойчивость регулярных рам различной этажности:  $k = 2,3$  – для рам одно- и двухпролётных и  $k = 2,5$  – для рам, имеющих три или четыре пролёта [4].

В случае расчёта рам с дискретно изменяющимися по высоте жесткостными параметрами, усреднённая сдвиговая жёсткость стержня, которым заменяется рама, принимается равной соответствующему значению  $GA$  для нижнего, наиболее нагруженного яруса рамы.

Остановимся на решении вопроса: как привести нагрузки одного яруса к верхней точке этого яруса? Согласно [5], силы, приложенные по длине стойки, можно перенести в верхнюю точку оси стойки (рис.2), получив приведенную силу:

$$P_{прив} = \sum P_i \mu(z_i), \quad (12)$$

$$\mu(z_i) = (z_i/H)^2, \quad (13)$$

где  $P_i$  – сумма нагрузок одного этажа в рассматриваемой раме;  $z_i$  – высотная отметка этого этажа относительно уровня заделки в фундаменте;  $H$  – полная высота рамы.

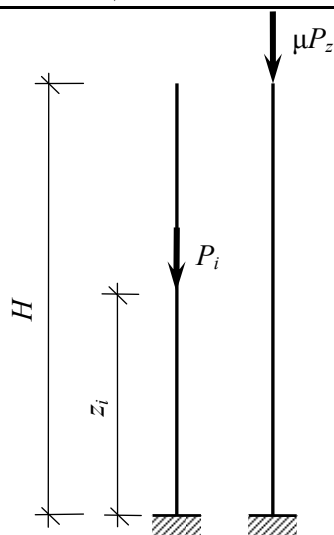


Рис. 2. Перенос сосредоточенной силы в верхнюю точку оси стойки

В случае приведения всех нагрузок одного этажа к верхней точке условного стержня, в формуле (12) следует ввести коррективы: для регулярных рам, имеющих равные нагрузки на всех этажах,  $P_{прив} = P_i \mu^*$ . Значения  $\mu^*$  для рам различной этажности были нами получены и сведены в таблицу.

Значения коэффициента  $\mu^*$  приведения нагрузки к верхним осевым точкам стоек рамы (в зависимости от этажности рамы)

Этажность рамы	$\mu^*$	Этажность рамы	$\mu^*$
1	1	6	2,528
2	1,25	7	2,857
3	1,556	8	3,1875
4	1,875	...	...
5	2,2	21	7,508

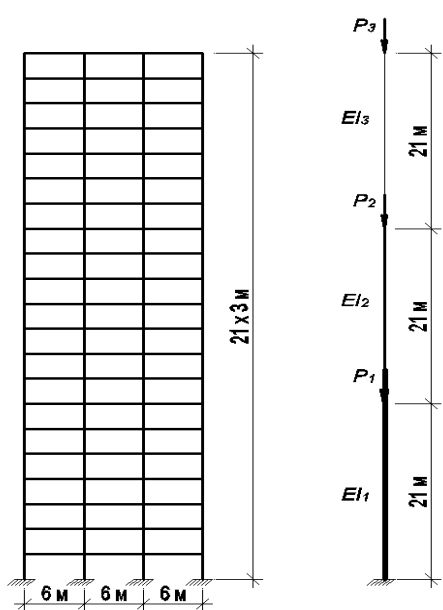


Рис. 3. К расчету на устойчивость

(или по ранее приведенной таблице для 7 этажей  $\mu^*=2,857$ ). Для остальных ярусов следует учитывать то, что нагрузки собираются только с определенных этажей и таблицей в этом случае пользоваться нельзя.

Рассмотрим более сложный пример (рис.3).

Определим критическую нагрузку для 3-пролётной 21-этажной рамы, разделённой по высоте на три яруса по 7 этажей в каждом. Исходные данные для рамы: пролёты по 6м, высоты этажей – 3 м, стойки сечением 40×40 см на первом ярусе, 35×35 см – на втором и 30×30 см – на третьем. Ригели 60×30 см. Бетон В20,  $E_b = 27,5 \cdot 10^3$  МПа. Равномерно распределённая нагрузка по ригелям рамы  $q_{п} = 100$  кН/м.

Для рассматриваемой трёхпролётной рамы сумма нагрузок первого яруса:

$$P_{прив.1-7} = \sum P_i \mu(z_i) = P \left( \frac{1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 + 5^2 + 6^2 + 7^2}{7^2} \right) = 2,857P$$

$$P_{\text{прив.8-14}} = \sum P_i \mu(z_i) = P \left( \frac{8^2 + 9^2 + 10^2 + 11^2 + 12^2 + 13^2 + 14^2}{14^2} \right) = 4,464P;$$

$$P_{\text{прив.15-21}} = \sum P_i \mu(z_i) = P \left( \frac{15^2 + 16^2 + 17^2 + 18^2 + 19^2 + 20^2 + 21^2}{21^2} \right) = 5,206P.$$

Таким образом, коэффициенты соотношения нагрузок:

$$\beta_1 = P_1 / P_1 = 1; \quad \beta_2 = P_2 / P_1 = 4,464 / 2,857 = 1,562;$$

$$\beta_3 = P_3 / P_1 = 5,206 / 2,857 = 1,822.$$

Изгибные жёсткости колонн:  $EI_{k1} = 58,667 \text{ МН} \cdot \text{м}^2$  – на первом ярусе,  $EI_{k2} = 34,39 \text{ МН} \cdot \text{м}^2$  – на втором,  $EI_{k3} = 18,563 \text{ МН} \cdot \text{м}^2$  – на третьем. Изгибные жесткости участков условного стержня, заменяющего раму (см. рис. 3):

$$EI_{1\text{усл}} = 792234,7 \text{ МН} \cdot \text{м}^2, \quad EI_{2\text{усл}} = 606512,6 \text{ МН} \cdot \text{м}^2, \quad EI_{3\text{усл}} = 445574,3 \text{ МН} \cdot \text{м}^2.$$

Примем расчётную жёсткость равной минимальному из полученных значений:  $EI = EI_{3\text{усл}} = 445574,3 \text{ МН} \cdot \text{м}^2$ . Таким образом, для рассматриваемой рамы коэффициенты соотношения жесткостей:  $\alpha_1=1,778$ ;  $\alpha_2=1,361$ ;  $\alpha_3=1$ ;  $\alpha_{12}=1,570$ ;  $\alpha_{23}=1,181$ .

Определитель критического состояния по (9) имеет вид:

$$A = \begin{vmatrix} 2 & -0,562c & 0 & -0,879c & 0 & -1,025c \\ 2,466c - 2 & 1 - 0,562c & 0 & -0,879c & 0 & -1,025c \\ 1 & 2,155c - 2 & 1 & -0,995c & 0 & -1,161c \\ 0 & 1 & 2,486c - 2 & 1 - 1,148c & 0 & -1,339c \\ 0 & 0 & 1 & 1,543c - 2 & 1 & -1,543c \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1,822c - 2 & 1 - 1,822c \end{vmatrix} = 0.$$

Наименьшее решение полученного определителя  $c = 0,04354$ ;  $\Delta = l/6$ .

Тогда  $k^2 = c/\Delta^2 = 36c/l^2 = P/EI$ , критическая сила Эйлера  $P_{\text{кр}} = 176 \text{ МН}$ .

Полученное значение критической силы соответствует нагрузке первого уровня  $P_1 = 2,857P_{\text{этажа, кр}}$ , тогда критическая нагрузка по Эйлеру на один этаж равна:  $176/2,857 = 61,6 \text{ МН}$ . Чтобы получить критическую силу с учетом сдвиговых деформаций условного стержня, нужно эти нагрузки привести к верху стержня. Для 21-этажной рамы  $\mu^* = 7,508$ , тогда

$$P_{\text{кр}}^0 = P_{\text{этажа, кр}} \cdot \mu^* = 61,6 \cdot 7,508 = 462,5 \text{ МН}.$$

Так как потерю устойчивости может инициировать нижний ярус рамы, вычислим сдвиговую жёсткость нижнего яруса по формуле (2). Определим податливость ячейки рамы. Суммарные погонные жёсткости:

стоек

$$s = \frac{EI_{\text{ст}}}{3} \cdot 4 = \frac{58,667}{3} \cdot 4 = 78,22 \text{ МН} \cdot \text{м},$$

ригелей

$$r = \frac{EI_{\text{риг}}}{6} \cdot 3 = \frac{148,5}{2} = 74,25 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Податливость  $\delta_1 = 0,01969 \text{ м/МН}$  (по формуле (5)).

Сдвиговая жёсткость условного стержня:

$$GA_{\text{усл}} = 3/0,01969 = 152,37 \text{ МН}.$$

С учётом деформаций сдвига по формуле Энгессера (коэффициент формы для 3-пролётной рамы  $k=2,5$ ):

$$P_{\text{кр}} = \frac{462,5}{1 + 2,5 \cdot \frac{462,5}{152,37}} = 53,8 \text{ МН}.$$

Для рассматриваемой рамы сумма нагрузок одного этажа  $P_i=18 \cdot 100=1800$  кН. Приведенная к верху условного стержня сила будет равна:

$$P_{\text{прив}} = P_i \mu^* = 1,8 \cdot 7,508 = 13,51 \text{ МН. (По таблице } \mu^* = 7,508).$$

Запас устойчивости рамы:  $n_y = P_{\text{кр}} / P_{\text{прив}} = 53,8 / 13,51 = 3,99$ .

Расчёт этой же трёхпролётной рамы на устойчивость с использованием программы SCAD даёт  $n_y=4,02$ . Разница составляет 0,8 %.

Для сравнения нами был выполнен расчёт устойчивости условного стержня, к которому приводится эта же рама, но постоянной по высоте стержня усреднённой изгибной жёсткостью, вычисленной по [4]:  $EI_{\text{усл}}^* = 714882 \text{ МН} \cdot \text{м}^2$ . Соотношение

нагрузок то же, что и в предыдущем примере:  $\beta_1 = P_1 / P_1 = 1$ ;  $\beta_2 = P_2 / P_1 = 1,562$ ;  $\beta_3 = P_3 / P_1 = 1,822$ . Наименьшее решение определителя, сформированного для этой задачи, равно:  $c = 0,02707$ ;  $\Delta = l / 6$ . Тогда  $k^2 = c / \Delta^2 = 36c / l^2 = P / EI$ , критическая сила

$$\text{Эйлера } P_{\text{кр}} = \frac{0,97452 EI_{\text{средн}}}{l^2} = \frac{0,97452 \cdot 714822}{63^2} = 176 \text{ МН} \text{ – для первого яруса}$$

рамы. Значение совпало с результатом, полученным в предыдущем расчёте. Дальнейшие выкладки те же.

Кроме того, был выполнен расчёт устойчивости условного стержня с переменной жёсткостью ярусов, но все нагрузки были приведены к его верху. Исходные данные:  $P_1 = P_2 = 0$ ,  $P_3 = 7,508 P_{\text{этажа}}$ . В этом случае запас устойчивости рамы составил:  $n_y = 3,96$ . Таким образом, все три варианта решения рассмотренной задачи дают одинаковый результат, что подтверждает правильность предлагаемой методики, основанной на МКР.

Необходимо отметить, что результаты расчета критических сил, полученные предлагаемым приближённым способом на основе метода конечных разностей для регулярных одно- и многопролётных рам, имеющих переменную жёсткость ярусов, совпадают с результатами расчета по программе SCAD до 98-99 %.

#### Список литературы

1. Свод правил СП53-102-2004. п.11.3.6. Расчетные длины колонн (стоек). – М., 2004.
2. Варвак, П.М. Метод сеток в задачах расчёта строительных конструкций / П.М. Варвак, Л. П. Варвак. – М.: Стройиздат, 1977. – 155 с.
3. Завьялова, О.Б. Исследование работы рам на горизонтальные нагрузки / О.Б. Завьялова // Известия вузов. Строительство. – 2004. – № 3. – С. 93–99.
4. Завьялова, О.Б. Применение условного сдвига-изгибного стержня при расчёте рам на устойчивость / О.Б. Завьялова, А.И. Шеин // Известия вузов. Строительство. – 2010. – №1. – С. 99–105.
5. Киселёв, В.А. Строительная механика. Спец. курс. Динамика и устойчивость сооружений / В.А. Киселёв. – М.: Стройиздат, 1980. – С. 480–498.
6. Engesser, F. Zentralblatt der Bauverwaltung, 1891, p. 481, 1907, p. 609.

#### References

1. Rulebook SP53-102-2004. p.11.3.6. Estimated length columns (columns). – М., 2004.
2. Varvak, P.M. Grid method in problems of design of structures / P.M. Varvak, L.P. Varvak. – М. Stroyizdat, 1977. – 155 p.
3. Zavyalova, O.B. Research work on the horizontal frame load / O.B. Zavyalova // Proceedings of the universities. Building. – 2004. – № 3. – P. 93–99.
4. Zavyalova, O.B. Apply conditional shear bending the rod in the calculation frame for stability / O.B. Zavyalova, A.I. Shein // Proceedings of the universities. Building. – 2010. – № 1. – P. 99–105.
5. Kiselev, V.A. Structural Mechanics. Spec. Rates. Dynamics and stability of structures / V.A. Kiselev – М.: Stroiizdat, 1980. – P. 480–498.
6. Engesser, F. Zentralblatt der Bauverwaltung, 1891, p. 481, 1907, p. 609.

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

**Шеин Александр Иванович,**  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой «Механика»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

**Шмелёв Данила Александрович,**  
аспирант кафедры «Механика»  
E-mail: danilashmel@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

**Shein Alexander Ivanovich,**  
Doktor of Sciences, Professor,  
Head of the Department «Mechanics»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

**Shmelev Danil Alexandrovich,**  
Postgraduate of the Department «Mechanics»  
E-mail: danilashmel@gmail.com

## ПОСТРОЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕАКТИВНЫХ ГАСИТЕЛЕЙ

А.И. Шеин, Д.А. Шмелев

Рассматривается задача построения математической модели системы активного гашения колебаний высотных зданий при сейсмических воздействиях с использованием простых и в то же время адекватных расчетных схем этих сооружений. Приведены результаты управления относительным движением здания при нестационарных переносных воздействиях.

*Ключевые слова: высотные здания, гашение колебаний, активный гаситель, расчетная модель, оптимальное управление.*

## CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF MATHEMATICAL MODEL OF HIGH-RISE BUILDINGS VIBRATION DAMPING BY REACTIVE DAMPERS

A.I. Shein, D.A. Shmelev

This paper considers the problem of constructing a mathematical model of the active damping of high-rise buildings under seismic loads using simple and, at the same time, adequate computational models of these structures. The results of controlling the relative motion of the building with portable transient effects are given.

*Keywords: high-rise buildings, vibration damping, active damper, the calculation model, the optimal control.*

Рассмотрим задачу построения математической модели активного гашения колебаний высотных сооружений при сейсмических воздействиях. Эта модель должна включать систему уравнений, описывающую напряженно-деформированное состояние сооружений, и систему эффективного управления их относительным движением. Исследуем поведение здания с гасителями при нестационарных кинематических воздействиях.

Высотные постройки бывают двух основных видов: высотные здания (небоскребы) и высотные сооружения в виде башен.

В [1] рассматривался вопрос выбора простой расчетной схемы высотного здания. При этом на основе анализа ряда расчетных схем была принята схема пластинчато-стержневого каркаса как системы с жесткими дисками перекрытий и с жестко прикрепленными к ним упругими колоннами, а также с ядром жесткости, аппроксимируемым стержнем повышенной жесткости (рис. 1). Если считать плиты перекрытий

абсолютно жёсткими дисками, то каждый такой диск будет совершать плоское движение, то есть каждый ярус (каждая жёсткая плита перекрытия) имеет три степени свободы  $u, v, \varphi$ . Таким образом, общее число степеней свободы высотного здания  $t = 3s$ , где  $s$  – число этажей.

Свяжем центры вращений дисков перекрытий с центром пересечения так называемого ядра жёсткости и плиты перекрытия. Пусть через эти точки пройдут начала координат ярусов (см. рис.1). Тогда каждый узел сопряжения колонны и плиты перекрытия  $j$ -го яруса будет иметь горизонтальные перемещения от поворота, определяемые соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} u_{ij}^{\text{пов}} &= -b_i \varphi_j \cdot \sin \gamma_i = -y_i \varphi_j, \\ v_{ij}^{\text{пов}} &= +b_i \varphi_j \cdot \cos \gamma_i = x_i \varphi_j. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $b_i$  – расстояние от начала координат до оси колонны;  $\gamma_i$  – угол наклона  $b_i$  – к оси  $x$ .

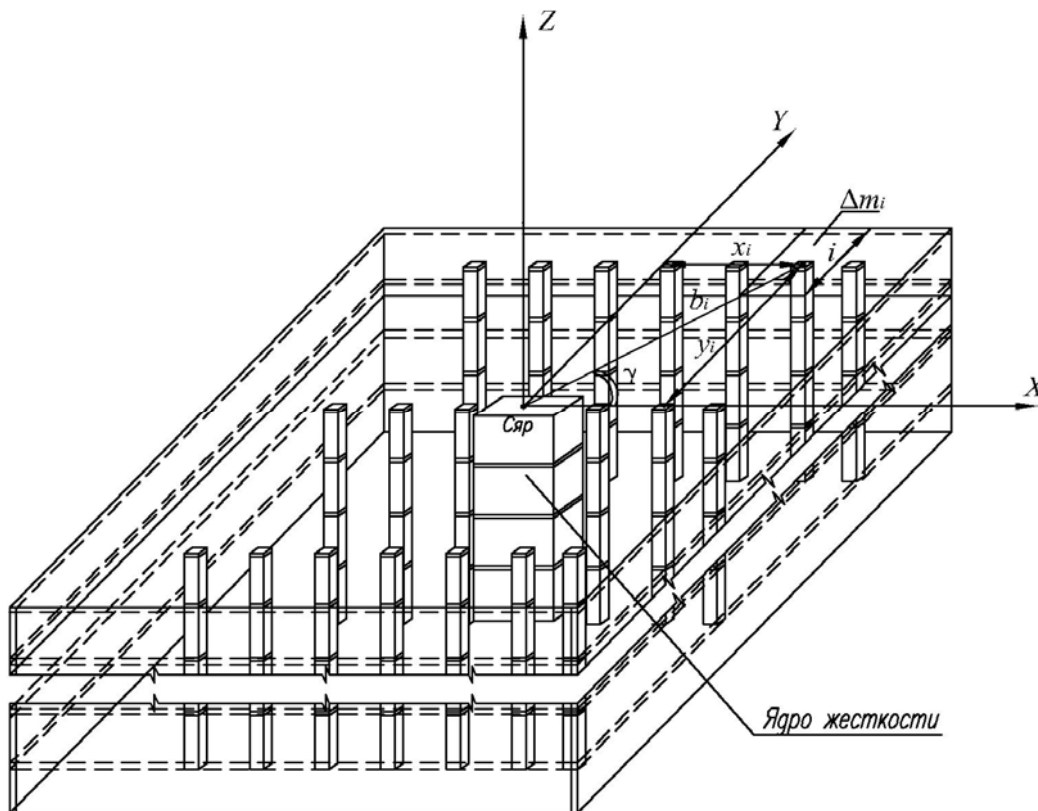


Рис.1. Схема высотного здания (перекрытия условно показаны прозрачными)

Матрица жёсткости одного яруса высотного здания будет иметь вид:

$$K_{\text{ярус}} = \begin{bmatrix} r & -r \\ -r & r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$r = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{12EI_{iy}}{l^3} & 0 & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n \frac{12EI_{ix}}{l^3} & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n \frac{GI_{ix}}{l} + \sum_{i=1}^n y_i^2 \frac{12EI_{iy}}{l^3} + \sum_{i=1}^n x_i^2 \frac{12EI_{ix}}{l^3} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты  $i$ -й колонны яруса;  $n$  – количество колонн на этаже.

При последовательной нумерации этажей и перемещений матрица жесткости высотного здания будет иметь вид:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11}^1 + k_{11}^2 & 0 & 0 & k_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_{22}^1 + k_{22}^2 & 0 & 0 & k_{25} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & k_{33}^1 + k_{33}^2 & 0 & 0 & k_{36} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ k_{41} & 0 & 0 & k_{44}^2 + k_{44}^3 & 0 & 0 & k_{47} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_{52} & 0 & 0 & k_{55}^2 + k_{55}^3 & 0 & 0 & k_{58} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & k_{s-3,s-3}^{(s/3)-1} + k_{s-3,s-3}^{s/3} & 0 & 0 & k_{s-3,s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & k_{s-2,s-2}^{s/3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & k_{s-1,s-1}^{s/3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & k_{s,s-3} & 0 & 0 & k_{s,s}^{s/3} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где верхний индекс означает номер этажа. При этом вектор перемещений запишется в виде:

$$U = \{u_1 v_1 \varphi_1 \dots u_s v_s \varphi_s\}^T. \quad (5)$$

Матрица масс, сосредоточенных в уровнях перекрытий, может быть записана в виде:

$$M = \text{diag} \{m_1 m_1 J_{z1}^m \dots m_s m_s J_{zs}^m\}, \quad (6)$$

где 
$$J_{zj}^m = \sum_{i=1}^n (\Delta m_i)(x_i^2 + y_i^2). \quad (7)$$

Здесь  $j$  – номер этажа.

Установим на жесткой плите покрытия систему реактивных гасителей колебаний. При этом для гашения линейных перемещений гасители можно закрепить в центре тяжести диска покрытия (начало координат), а для создания пары сил, гасящей вращательные движения, – по центральным краям этой плиты. Жидкостный гаситель должен иметь радиальные выходные отверстия и отверстия, обеспечивающие пару сил.

Расчётную схему высотной башни удобно аппроксимировать шарнирно-стержневой системой [2]. Для шарнирно-стержневой системы матрицы жёсткости и внутреннего демпфирования конечного элемента системы имеют вид:

$$k_i = \frac{EA_i}{l_i} \begin{bmatrix} e_i & -e_i \\ -e_i & e_i \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$b_{i, \text{тп}} = \frac{EA_i \chi_y}{2l_i} \begin{bmatrix} e_i & -e_i \\ -e_i & e_i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где  $\chi_y$  – коэффициент, характеризующий вязкость материала;  $E$  – модуль упругости материала;  $A_i$  и  $l_i$  – соответственно площадь поперечного сечения и длина  $i$ -го элемента;

$$e_i = \begin{bmatrix} (c_1 c_1)_i & (c_1 c_2)_i & (c_1 c_3)_i \\ (c_2 c_1)_i & (c_2 c_2)_i & (c_2 c_3)_i \\ (c_3 c_1)_i & (c_3 c_2)_i & (c_3 c_3)_i \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Здесь  $c_j$  – направляющие косинусы наклона  $i$ -го элемента к  $j$ -й оси общей системы координат.

При узловом распределении масс шарнирно-стержневой системы матрица масс будет иметь диагональную структуру:

$$M = \text{diag} \{m_1 m_1 m_1 \dots m_n m_n m_n\}. \quad (11)$$

Здесь  $n$  – число перемещений узлов.

Решение проблемы повышения динамической прочности, устойчивости, долговечности и надёжности работы механических систем, таких, как высотные башни и здания, связано с применением систем и устройств гашения колебаний. Работа этих систем и устройств основана на создании сил противодействия движению или сил, изменяющих ритм движения. Эти силы могут иметь разную физическую природу.

Введём классификацию некоторых силовых воздействий, влияющих на движение механических систем и имеющих различную физическую природу (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Наименование силы	Математическая формула вычисления силы
1	Гравитационная сила (сила тяготения)	$m\bar{g}$
2	Сила упругости	$c \cdot \Delta(t)$
3	Реактивная сила	$F_i = V_\Gamma \cdot \frac{dm}{dt}$
4	Электромагнитная сила	$\frac{\partial T}{\partial q}$
5	Сила инерции (условная сила)	$-m \cdot \bar{a}(t)$
6	Сила трения	$-\alpha \cdot v(t)$

В таблице использованы следующие обозначения:  $m$  – инертная масса тела;  $c$  – жёсткость упругой системы;  $\Delta$  – перемещение упругой системы;  $V_\Gamma$  – скорость истечения газов из сопла реактивной установки;  $T$  – энергия магнитного поля;  $q$  – зазор электромагнитного привода;  $a$  – ускорение материальной точки;  $\alpha$  – коэффициент сопротивления движению;  $v$  – скорость движения точки системы.

Работа маятниковых гасителей колебаний осуществляется за счёт комбинации двух сил – силы тяготения и силы инерции. Динамические одномассовые и многомассовые гасители колебаний пружинного типа работают также на основе комбинации двух сил – силы упругости и силы инерции. Гасители колебаний ударного типа – маятниковой или пружинной конструкции – осуществляют мгновенное преобразование энергии удара в импульс силы упругости. Демпфирующие устройства используют силы трения для рассеивания энергии колебаний.

Вышеперечисленные гасители колебаний обычно применяются для пассивного управления динамикой сооружений или деталей машин.

Реактивные и/или электромагнитные силы могут быть использованы для разработки активных гасителей колебаний.

Активные гасители колебаний подразделяются на два основных вида:

- 1) системы управления свойствами пассивного гашения колебаний;
- 2) системы, в которых создаётся управляемая сила активного гашения.

В работе [3] предложен гаситель колебаний на основе реактивной силы струи воды. Величиной реактивной силы можно управлять, изменяя площадь сечений выходных отверстий и избыточное давление в резервуаре. Гаситель данного типа экологически безопасен и весьма эффективен при коротких и средних по продолжительности воздействиях. Реактивные гасители колебаний могут быть особенно эффективны при нагрузках и кинематических возмущениях нестационарного характера, таких, как сейсмические воздействия [4, 5].



Некоторым недостатком жидкостного активного гасителя является его сравнительно высокая начальная масса и время, необходимое на открытие-закрытие клапанов выброса воды. Этим недостаткам лишен реактивный гаситель на основе реактивных установок типа жестко связанных с перекрытиями систем реактивных зарядов.

Движение механической системы с реактивным гасителем, подверженной кинематическим воздействиям, описывается матричным конечно-элементным уравнением:

$$M\ddot{U} + B\dot{U} + KU = -M\ddot{\Delta} + F, \quad (12)$$

где  $B$  – матрица демпфирования;  $U$  – вектор относительных (вызванных деформациями) перемещений;  $\Delta$  – переносные (сейсмические) перемещения;  $F$  – вектор реактивных воздействий,

$$F = \{000\dots F_{iu} F_{iv} F_{i\varphi} 0 0\dots F_{ku} F_{kv} F_{k\varphi} 0\dots 0\}^T. \quad (13)$$

Здесь  $F_i$  – реактивная сила или пара сил, действующих по направлению  $u$ ,  $v$  или  $\varphi$  в уровне  $i$ -го перекрытия здания,

$$F_i = V_{\Gamma} \cdot \frac{dm}{dt}. \quad (14)$$

Уравнение движения по  $i$ -му направлению будет иметь вид:

$$m_i \ddot{u}_i + \sum_{k=1}^n b_{ik} \dot{u}_k + \sum_{k=1}^n k_{ik} u_k = -m_i \ddot{\Delta} + F_i. \quad (15)$$

Используя конечно-разностную аппроксимацию производных по временной координате [6], перепишем уравнение (15) в виде:

$$m_i \frac{2(\alpha u_{i,t-\Delta t} - (1+\alpha)u_{i,t} + u_{i,t+\Delta t})}{\alpha(\alpha+1)(\Delta t)^2} + \sum_{k=1}^n b_{ik} \frac{u_{k,t+\Delta t} - u_{k,t-\Delta t}}{(\alpha+1)\Delta t} + \sum_{k=1}^n k_{ik} \cdot u_{k,t} = -m_i \ddot{\Delta}_t + F_{i,t}, \quad (16)$$

где  $\alpha$  – коэффициент изменения шага по времени.

При известном значении  $F_{i,t}$  легко вычисляется  $u_{i,t+\Delta t}$  и вообще весь вектор  $U_{t+\Delta t}$ . Задачей гашения колебаний является уменьшение относительных перемещений сооружения, вызванных переносными сейсмическими воздействиями.

Поставим задачу оптимизации параметров относительного движения:

$$f(u_{j,t+\Delta t}, \dot{u}_{j,t+\Delta t}) \longrightarrow \min \quad (17)$$

при 
$$F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max}, \quad (18)$$

где  $f(u_{j,t+\Delta t}, \dot{u}_{j,t+\Delta t})$  – целевая функция, состоящая из оптимизируемых параметров управления движением;  $j$  – номер перемещения;  $u_{j,t+\Delta t}, \dot{u}_{j,t+\Delta t}$  – перемещения и скорости центральной точки перекрытия яруса (полюса), включая угловую скорость вращения.

Определим параметры движения, настройка гасителей по которым дает максимальный эффект. Для гашения колебаний будем использовать один или два гасителя.

Данную задачу решаем на каждом шаге движения по временной координате [6], обеспечивая, таким образом, оптимальное управление динамикой здания.

Для проведения численных экспериментов по решению динамических задач МКЭ и графической интерпретации результатов в среде MATLAB разработан программный

комплекс DA (Dinamika Active). При проведении численных экспериментов исследовался предложенный в работе [3] активный жидкостный гаситель колебаний (рис. 2). В частности, рассматривалась работа одного и двух гасителей, установленных на механическую систему, подверженную сейсмическому воздействию. Для придания максимального эффекта активным гасителям исследовались параметры, задействованные в процессе управления гасителями колебаний.

Алгоритм действия активного жидкостного гасителя колебаний подробно описан в [3, 4]. Принцип его работы состоит в создании знакопеременной реактивной силы, препятствующей относительным (изгибным) перемещениям (колебательным движениям) сооружения. Данная сила возникает при выбросе из ёмкости струй рабочей жидкости через противоположно расположенные клапаны при их поочерёдном открытии (закрытии) под действием избыточного давления  $p_0$ .

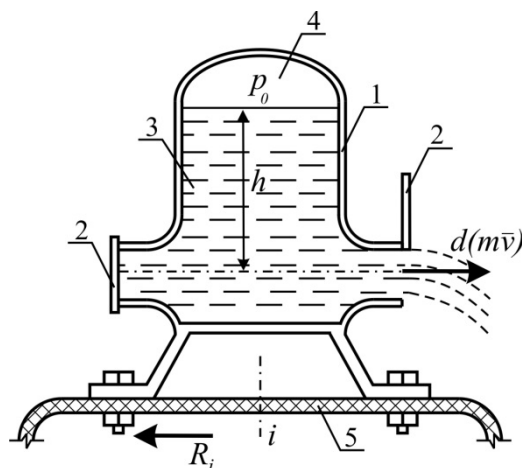


Рис. 2. Схема работы активного жидкостного гасителя:  
1 – ёмкость гасителя; 2 – клапан; 3 – рабочая жидкость;  
4 – газ под давлением; 5 – защищаемая конструкция

Механическая система представляет собой десятиэтажную стержневую конструкцию. В случае с одним гасителем он устанавливался на 10-м этаже, при двух гасителях – они располагались на 10-м и 7-м этажах. Кинематика возбуждения колебаний соответствовала акселерограмме землетрясения в г. Броули (штат Калифорния, США). Исследуемыми параметрами являлись перемещения узлов конструкции, требуемая реактивная сила, начальная масса гасителей, так как учитывалось изменение массы системы при вытекании жидкости из гасителя в процессе его работы. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Параметры		Количество гасителей колебаний	
		Один гаситель	Два гасителя
Эффект от работы гасителя	Уменьшение перемещений 10-го этажа на	94,95 %	99,97 %
	Уменьшение перемещений 9-го этажа на	84,03 %	99,77 %
	Уменьшение перемещений 7-го этажа на	43,72 %	99,98 %
	Уменьшение перемещений 5-го этажа на	1,56 %	88,84 %
	Уменьшение перемещений 1-го этажа на	-61,95 %	49,41 %
Требуемая реактивная сила	1-го гасителя	22 кН	6 кН
	2-го гасителя	-	16 кН
Начальная масса гасителей в процентах от массы конструкции	1-го гасителя	3,27 %	1,09 %
	2-го гасителя	-	2,62 %
	В сумме	3,27 %	3,71 %

Параметрами процесса управления движением являются различные сочетания перемещений, минимальное значение которых должно быть обеспечено требуемой для этого реактивной силой.

Результаты исследований настройки гасителя по разным целевым функциям представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Параметр управления	Уменьшение перемещений			
	10-го этажа		7-го этажа	
	Один гаситель	Два гасителя	Один гаситель	Два гасителя
$U_{10\text{этаж}} \longrightarrow \min$	94,93 %	94,97 %	43,71 %	98,1 %
$U_{10\text{этаж}} - U_{7\text{этаж}} \longrightarrow \min$	86,67 %	94,95 %	36,54 %	93,62 %
$U_{10\text{этаж}}^2 - U_{7\text{этаж}}^2 \longrightarrow \min$	94,92 %	87,1 %	43,7 %	88,25 %
$U_{10\text{этаж}}^2 + U_{7\text{этаж}}^2 \longrightarrow \min$	94,95 %	99,97 %	43,72 %	99,98 %
$R_{\text{сопр}} = F = m_i \cdot \ddot{\Delta}$	78,58 %	79,42 %	29,55 %	80,57 %

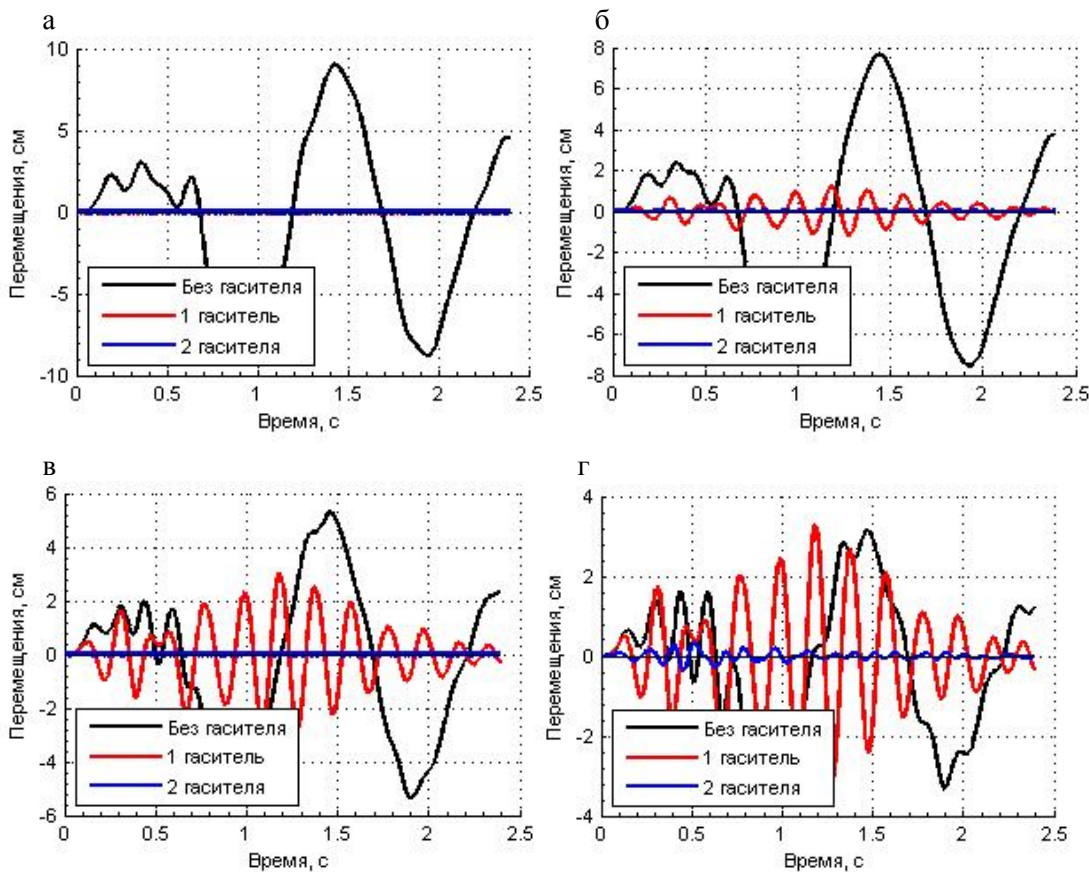


Рис. 3. Перемещения этажей башни с одним и двумя гасителями:  
 а – 10-й этаж; б – 9-й этаж; в – 7-й этаж; г – 5-й этаж

**Выводы.** Один активный жидкостный гаситель колебаний, установленный на верхнем этаже конструкции, эффективно уменьшает размах колебаний верхней зоны сооружения. При установке второго гасителя повышается эффективность гашения размаха колебаний всей системы, несмотря на увеличение нагрузки на конструкцию из-за добавления массы второго гасителя. В случае установки двух гасителей колебаний наиболее результативной является их настройка на минимум суммы квадратов средних перемещений этажей.

Проведённые исследования подтверждают, что активный жидкостный гаситель колебаний является эффективным средством управления процессом гашения сейсмических колебаний.

### Список литературы

1. Шеин, А.И. Выбор расчетной модели для динамических испытаний гасителей колебаний высотных сооружений / А.И. Шеин, Д.А. Романков // Актуальные проблемы механики в современном строительстве: сборник трудов Международной конференции. – Пенза, 2013. – С.185–194.
2. Шеин, А.И. Снижение уровня колебаний системы «упругое основание – высотное сооружение» с помощью нелинейного динамического гасителя / А.И. Шеин, О.Г. Земцова // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №2(11). – С. 83–91.
3. Шеин, А.И. Активный жидкостный гаситель колебаний высотных сооружений при сейсмических воздействиях / А.И. Шеин, О.Г. Земцова, Д.А. Шмелёв, Р.Х. Рахматуллин // Актуальные проблемы современного строительства: сборник трудов Международной конференции. – Пенза, 2013. – С. 365–367.
4. Шеин, А.И. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях / А.И. Шеин, Д.А. Шмелев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – №1.
5. Шеин, А.И. Сравнительная оценка работоспособности реактивного жидкостного гасителя колебаний при сейсмических колебаниях башен, заданных акселерограммами / А.И. Шеин, Д.А. Шмелев // Актуальные проблемы механики в современном строительстве: сборник трудов Международной конференции. – Пенза, 2013. – С.175–185.
6. Шеин, А.И. Метод смещенных разностей для решения дифференциальных уравнений движения механической системы / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – №2. – С. 38–41.

### References

1. Shein, A.I. Select estimated model for the dynamic tests of the shock absorbers of high-rise structures / A.I. Shein, D.A. Romankov // Advanced problems in mechanics in modern construction: proceedings of the International conference. – Penza, 2013. – P.185–194.
2. Shein, A.I. Reduction of the level of oscillations of a system of «elastic Foundation, a high – rise building with a nonlinear dynamic absorber / A.I. Shein, O.G. Zemtsova // Regional architecture and construction. – 2011. – №2(11). – P. 83–91.
3. Shein, A.I. Active liquid damper of high-rise buildings under seismic loads / A.I. Shein, OG Zemtsov, D.A. Shmelev, R.H. Rakhmatullin // Actual problems of modern construction: proceedings of the International conference. – Penza, 2013. – P. 365–367.
4. Shein, A.I. Evaluation of the effectiveness of the active liquid damper tall structures under nonstationary impacts / A.I. Shein, D.A. Shmelev // Structural Mechanics and calculation of structures. – 2014. – №1.
5. Shein, A.I. Comparative evaluation of the performance of reactive liquid shock absorber when seismic oscillations towers specified accelerogramms / A.I. Shein, D.A. Shmelev // Advanced problems in mechanics in modern construction: proceedings of the International conference. – Penza, 2013. – P.175–185.
6. Shein, A.I. Method of offset differences for the solution of the differential equations of motion of a mechanical system / A.I. Shein, M.B. Zaitsev // Structural Mechanics and calculation of structures. – 2012. – №2. – P. 38–41.

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

**Гарькин Игорь Николаевич**,  
аспирант  
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

**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

**Garkin Igor Nikolaevich**,  
Postgraduate  
E-mail: igor\_garkin@mail.ru

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов, И.Н. Гарькин

Рассматривается приложение методов корреляционного и спектрального анализа к обработке данных мониторинга сложных конструкций; приводятся алгоритмы, прошедшие апробацию при проектировании мобильных систем различного назначения.

*Ключевые слова:* мониторинг сложных конструкций, обработка данных, корреляционные и спектральные методы, удар и сопровождающая вибрация.

## CORRELATION AND SPECTRAL METHODS IN MONITORING COMPLEX DESIGNS

I.A. Garkina, A.M. Danilov, I.N. Garkin

The authors consider the application of correlation and spectral analysis methods to data processing of monitoring complex structures; algorithms that have been tested in the design of mobile systems for various applications are provided.

*Keywords:* monitoring of complex systems, processing data, correlation and spectral methods, shock and accompanying vibration.

При анализе и обработке данных при проектировании и эксплуатации сложных систем (например сложных конструкций, тренажных и обучающих комплексов для подготовки операторов эргатических систем в различных отраслях промышленности и др. [1–5]) широко используется описание сигналов функциями частоты (в виде суммы более простых сигналов). Обычно переход в частотную область осуществляется по преобразованию Фурье:

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

где  $S(\omega)$  – спектральная функция или спектральная плотность (комплексная функция; имеет размерность сигнала, умноженную на время;  $|S(\omega)|$  – спектр амплитуд,

$\psi(\omega) = \arg(S(\omega))$  – спектр фаз). Функция  $x(t)$  представляется в виде суммы бесконечного ряда гармонических составляющих с амплитудами  $\frac{|S(\omega)|}{\pi} d\omega$ , непрерывно заполняющими интервал частот от 0 до  $\infty$ , и начальными фазами  $\psi(\omega)$ . Представление  $S(\omega)$  дает возможность установить физический смысл  $x(t)$ . Однако следует помнить, что установление точности определения спектра требует знания точного спектра. Именно поэтому, несмотря на широкую распространенность использования представления функций в частотной области, вынуждены пользоваться представлениями и во временной области.

При мониторинге сложных конструкций используются анализаторы спектров, отличающиеся, в основном, лишь по диапазону частот, по принципу действия, по способу обработки, по характеру анализа (скалярные и векторные); определяются амплитуды и частоты спектральных компонент в составе анализируемого процесса. Важнейшей характеристикой анализатора спектра является разрешающая способность (наименьший интервал  $\Delta f$  по частоте между двумя спектральными линиями, которые ещё разделяются анализатором спектра). Истинный спектр можно получить лишь тогда, когда анализируемое колебание  $x(t)$  периодически, либо существует только в пределах интервала  $T$ . Анализатор позволяет получить не истинный спектр

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

а лишь его оценку

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

(зависит от  $t_1$  и  $T$ ; оценка  $S_T(t_1, \omega)$  определяет текущий спектр).

По заданному частотному спектру можно определить временную форму сигнала:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

В отличие от спектрального описания детерминированных функций спектральное описание случайного процесса проводится для его статистической характеристики – автокорреляционной функции  $R(\tau)$ . В большинстве случаев практически возможна аппроксимация автокорреляционных функций экспоненциальными или экспоненциально-косинусными выражениями:

$$R(\tau) = \sum_{k=1}^n A_k e^{-c_k |\tau|}; \quad (1)$$

$$R(\tau) = A_0 e^{-c_0 |\tau|} \cos \beta \tau + \sum_{k=1}^n A_k e^{-c_k |\tau|}. \quad (2)$$

В этом случае спектральные плотности выражаются с помощью дробно-рациональной функции (соотношение двух полиномов, содержащих четные степени частоты  $\omega$ ).

Если  $R(\tau)$  имеет вид (1), то спектральная плотность определяется формулой

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau = \\ &= 2 \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau) \cos \omega \tau d\tau = 2 \sum_{k=1}^n A_k \int_0^{\infty} e^{-c_k \tau} \cos \omega \tau d\tau = 2 \sum_{k=1}^n \frac{A_k c_k}{c_k^2 + \omega^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

При аппроксимации вида (2)

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

С учетом (3) второе слагаемое в выражении  $S_{xx}(\omega)$  представляется в виде

$$2 \sum_{k=1}^n \frac{A_k c_k}{c_k^2 + \omega^2}.$$

Что касается первого слагаемого, то справедливы следующие преобразования:

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= 2A_0 \int_0^{\infty} e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau \cos \omega\tau d\tau = A_0 \int_0^{\infty} e^{-c_0|\tau|} [\cos(b-\omega)\tau + \cos(b+\omega)\tau] d\tau = \\ &= A_0 c_0 \left[ \frac{1}{c_0^2 + (b-\omega)^2} - \frac{1}{c_0^2 + (b+\omega)^2} \right] = 2A_0 c_0 \frac{(c_0^2 + b^2) + \omega^2}{\omega^4 + 2(c_0^2 - b^2)\omega^2 + (c_0^2 + b^2)^2}. \end{aligned}$$

Таким образом, в случае аппроксимации автокорреляционной функции выражением вида (2) получим

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

При аппроксимации автокорреляционной функции выражением (1) сначала выберем такое положительное число  $c$ , чтобы функция  $e^{-c|\tau|}$  стремилась к нулю приблизительно с такой же скоростью, как и  $R_{xx}(\tau)$ . Тогда, полагая в (1)  $c_k = kc$ , получим

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{k=1}^n A_k e^{-kc|\tau|}. \quad (5)$$

Для определения коэффициентов  $A_k$  автокорреляционную функцию представим в виде

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{k=1}^n B_k \varphi_k(\tau); \quad (6)$$

$$\varphi_1(\tau) = a_1 e^{-c|\tau|},$$

$$\varphi_2(\tau) = a_{21} e^{-c|\tau|} + a_{22} e^{-2c|\tau|},$$

...

$$\varphi_n(\tau) = a_{n1} e^{-c|\tau|} + a_{n2} e^{-2c|\tau|} + \dots + a_{nn} e^{-nc|\tau|}.$$

Коэффициенты  $a_{ki}$  ( $k \geq i$ ) определяются из условий ортогональности

$$\int_0^{\infty} \varphi_k(\tau) \varphi_i(\tau) d\tau = 0, \quad k \neq i$$

и нормированности

$$\int_0^{\infty} \varphi_k^2(\tau) d\tau = 1.$$

В частности, из условия нормированности  $\varphi_1(\tau)$  следует

$$\int_0^{\infty} a_{11}^2 e^{-2c\tau} d\tau = 1.$$

Откуда определится  $a_{11} = \sqrt{2c}$ . Коэффициенты  $a_{21}$  и  $a_{22}$  определяются из условий нормированности функций  $\varphi_2(t)$  и ее ортогональности по отношению к  $\varphi_1(t)$ :

$$\int_0^{\infty} (a_{21}e^{-c\tau} + a_{22}e^{-2c\tau})^2 d\tau = 1;$$

$$\int_0^{\infty} a_{11}e^{-c\tau} (a_{21}e^{-c\tau} + a_{22}e^{-2c\tau}) d\tau = 0.$$

Отсюда получаем

$$a_{22} = \sqrt{36c}, \quad a_{21} = -4\sqrt{c}.$$

Аналогично определяются все другие коэффициенты  $a_{ki}$ .

Во многих случаях удается ограничиться  $n \leq 5$ . Тогда:

$$\begin{aligned} \varphi_1(\tau) &= \sqrt{2c}e^{-c|\tau|}, \\ \varphi_2(\tau) &= \sqrt{c}(-4e^{-c|\tau|} + 6e^{-2c|\tau|}), \\ \varphi_3(\tau) &= \sqrt{6c}(3e^{-c|\tau|} - 12e^{-2c|\tau|} + 10e^{-3c|\tau|}), \\ \varphi_4(\tau) &= \sqrt{2c}(-8e^{-c|\tau|} + 60e^{-2c|\tau|} - 120e^{-3c|\tau|} + 70e^{-4c|\tau|}), \\ \varphi_5(\tau) &= \sqrt{10c}(5e^{-c|\tau|} - 60e^{-2c|\tau|} + 210e^{-3c|\tau|} - 280e^{-4c|\tau|} + 126e^{-5c|\tau|}). \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициенты  $B_k$  в выражении (6) определяются из условия минимума среднего квадрата ошибки аппроксимации

$$I = \int_0^{\infty} \left[ R_{xx}(\tau) - \sum_{k=1}^n B_k \varphi_k(\tau) \right]^2 d\tau = \min. \quad (8)$$

Приравнявая частные производные функционала (8) по коэффициентам  $B_k$  к нулю, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial B_k} &= 2 \int_0^{\infty} \left[ R_{xx}(\tau) - \sum_{i=1}^n B_i \varphi_i(\tau) \right] \varphi_k(\tau) d\tau = \\ &2 \left[ \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau) \varphi_k(\tau) d\tau - \sum_{i=1}^n B_i \int_0^{\infty} \varphi_i(\tau) \varphi_k(\tau) d\tau \right] = 0. \end{aligned}$$

Из

$$\int_0^{\infty} \varphi_i(\tau) \varphi_k(\tau) d\tau = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq k, \\ 1 & \text{при } i = k \end{cases}$$

получим

$$\frac{\partial I}{\partial B_k} = 2 \left[ \int_0^{\infty} R(\tau) \varphi_k(\tau) d\tau - B_k \right].$$

Откуда из  $\frac{\partial I}{\partial B_k} = 0$  имеем:

$$B_k = \int_0^{\infty} R(\tau) \varphi_k(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Получили нижеследующий алгоритм аппроксимации автокорреляционной функции случайного процесса в виде (1).

1. Выбрать число  $n$  в выражении (1) из соображений допустимой сложности (1) и ожидаемой точности аппроксимации (эти соображения альтернативны, так как с ростом  $n$  одновременно растет сложность и точность аппроксимации).



2. Выбрать подходящее значение в выражении (1) так, чтобы функция  $e^{-c\tau}$  стремилась к нулю приблизительно с такой же скоростью, как и  $R_{xx}(\tau)$ .

3. По выражениям (8) определить значения функций  $\varphi_k(\tau)$ .

4. Используя функции  $\varphi_k(\tau)$ , определить  $B_k = \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau)\varphi_k(\tau)d\tau$

(для этой цели интегралы заменяются суммами  $B_k^* = \sum_{\mu=0}^{\mu_{\max}} R_{xx}(\mu)\varphi_k(\mu)\Delta$ ,

где  $R_{xx}(\mu), \varphi_k(\mu)$  – дискретные значения  $R_{xx}(\tau)$  и  $\varphi_k(\tau)$ ,  $\Delta$  – шаг по  $\tau$ ).

5. Представить автокорреляционную функцию в виде суммы

$$R_{xx}(\tau) \approx B_1\varphi_1(|\tau|) + B_2\varphi_2(|\tau|) + \dots + B_n\varphi_n(|\tau|). \quad (10)$$

6. Привести подобные члены, и автокорреляционную функцию представить в виде

$$R_{xx}(\tau) \approx A_1e^{-c_1|\tau|} + A_2e^{-2c_1|\tau|} + \dots + A_ne^{-nc_1|\tau|}.$$

Рассмотрим далее случай аппроксимации автокорреляционной функции выражением (2). Представим выражение (2) в виде

$$R_{xx}(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau), \quad (11)$$

где

$$R_1(\tau) = A_0e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau; \quad (12)$$

$$R_2(\tau) = \sum_{k=1}^n A_0e^{-c_k|\tau|}. \quad (13)$$

Положим в первом приближении

$$R_{xx}(\tau) \approx R_1(\tau) = A_0e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau. \quad (14)$$

Коэффициенты  $A_0, c_0$  могут быть подобраны простыми методами, так как аппроксимация вида (14) является первым приближением, которое затем уточняется. Можно предложить следующие формулы для подбора значений коэффициентов в выражении (14):

$$A_0 = R(0), b = \frac{k\pi}{T_k}, c_0 = \frac{b}{\pi} \ln \left| \frac{R(0)}{R(\tau_1)} \right|,$$

где  $T_k$  – точка, в которой автокорреляционная функция  $k$ -й раз пересекает ось абсцисс ( $R(T_k) = 0$ ),  $R(\tau_1)$  – значение первого отрицательного максимума автокорреляционной функции.

Далее рассмотрим функцию

$$R_2(\tau) = R_{xx}(\tau) - R_1(\tau)$$

или

$$R_2(\tau) = R_{xx}(\tau) - A_0e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau. \quad (15)$$

Аппроксимируем  $R_2(\tau)$  выражением вида (13) методом, описанным выше.

В результате вычислений получим аппроксимацию автокорреляционной функции  $R_{xx}(\tau)$  выражением вида (2).

Сделаем несколько важных замечаний. К аппроксимации автокорреляционной функции даже в рамках корреляционной теории нужно подходить очень осторожно, чтобы не допустить грубой ошибки. Обратим внимание хотя бы на тот факт, что

полученное в результате аппроксимации с конечным числом членов выражение (5) для корреляционной функции может вообще не являться автокорреляционной функцией какого-либо стационарного случайного процесса, так как нельзя утверждать, что при конечном числе членов  $n$  при всех значениях  $\omega$  спектральная плотность по выражению (3) всюду неотрицательна. Отметим, что с помощью выражения (5) при бесконечном  $n$  можно получить сколь угодно точную аппроксимацию автокорреляционной функции реального процесса, но с ростом  $n$  расчеты усложняются.

Далее. Не всякая кривая, обладающая основными свойствами автокорреляционной функции

- 1)  $R(0) > 0$ ,
- 2)  $R(-\tau) = R(\tau)$ ,
- 3)  $|R(\tau)| \leq R(0)$ ,

является автокорреляционной функцией реального процесса, но всякая функция является автокорреляционной функцией для некоторого стационарного случайного процесса, если она обладает этими свойствами и полученная по этой функции спектральная плотность всюду неотрицательна.

Если не выполняется условие  $S_{xx}(\omega) \geq 0$  для всех  $\omega$ , то необходимо увеличить число членов  $n$  и вычислить заново коэффициенты в выражении (5).

Можно показать, что наилучшая в смысле метода наименьших квадратов аппроксимация  $R_{xx}(\tau)$  автоматически дает наилучшую аппроксимацию  $S_{xx}(\omega)$  суммой вида (3).

Заметим, что процедура аппроксимации корреляционной функции эквивалентна сглаживанию ее оценки.

Алгоритм аппроксимации автокорреляционной функции стационарного случайного процесса экспоненциально-косинусным выражением вида (2) приводится ниже.

1. Вычислить  $A_0, b, c_0$  по формулам (4).
2. Вычислить дискретные значения  $R_2(\mu)$  с шагом по времени

$$\Delta = \frac{\tau_{\max}}{\mu_{\max}}$$

по формуле (7) при  $\mu = 0, 1, 2, \dots, \mu_{\max}$ .

3. Выбрать параметр  $c$  по поведению  $R_2(\tau)$  (по графику).
4. Выбрать число членов  $n$  вида

$$A_k e^{-ck|\tau|} = A_k e^{-c_k|\tau|}$$

в выражении  $R_2(\tau) = R_{xx}(\tau) - A_0 e^{-c_0|\tau|} \cos b\tau = \sum_{k=1}^n A_k e^{-c_k|\tau|}$ ,  $c_k = ck$ .

5. Вычислить  $\varphi_1(\tau), \varphi_2(\tau), \dots, \varphi_n(\tau)$  по формулам (8).
6. Вычислить

$$B_k = \sum_{\mu=0}^{\mu_{\max}} R_2(\mu) \varphi_k(\mu) \Delta = \Delta \sum_{\mu=0}^{\mu_{\max}} R_2(\mu) \varphi_k(\mu).$$

7. Вычислить  $A_k$  по формулам:

$$A_1 = \sqrt{2c}B_1 - 4\sqrt{c}B_2 + 3\sqrt{6c}B_3 - 8\sqrt{2c}B_4 + 5\sqrt{10c}B_5,$$

$$A_2 = 6\sqrt{c}B_2 - 12\sqrt{6c}B_3 + 60\sqrt{2c}B_4 - 60\sqrt{10c}B_5,$$

$$A_3 = 10\sqrt{6c}B_3 - 120\sqrt{2c}B_4 + 210\sqrt{10c}B_5,$$

$$A_4 = 70\sqrt{2c}B_4 - 280\sqrt{10c}B_5,$$

$$A_5 = 126\sqrt{10c}B_5.$$

8. Вычислить дискретные значения  $R_{xx}(\mu) = R_1(\mu) + R_2(\mu)$ .

9. Вычислить дискретные значения спектральной плотности  $S_{xx}(\omega)$  в диапазоне  $0 \leq \omega \leq \omega_{\max}$  по формуле (4).

10. Если  $S_{xx}(\omega) \geq 0$ , аппроксимацию завершить. Если существует такое  $\omega_i$ , что  $S_{xx}(\omega) < 0$ , то увеличить число членов  $n$  и повторить вычисления по п.п. 5–9.

Алгоритмы прошли практическую апробацию при решении задач оценки работоспособности оборудования мобильных систем при ударе и сопровождающей вибрации [6], а также при разработке тренажных и обучающих комплексов для различных отраслей промышленности [2].

#### Список литературы

1. Andreev, A.N. Information models for designing conceptual broad-profile flight simulators / A.N. Andreev [etc.] // Measurement Techniques. August 2000. – Vol.43. Issue 8. – P.667–672.
2. Авиационные тренажеры модульной архитектуры: моногр. / Э.В. Лапшин [и др.]; под ред. Э.В. Лапшина, А.М. Данилова. – Пенза, ИИЦ ПГУ. – 2005. 146 с.
3. Еремкин, А.И. Промышленные и аэрокосмические приложения системных методологий, идентификации систем и теории управления / А.И. Еремкин, А.П. Прошин, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Наука и технологии. Избранные труды. – М.: РАН. – 2005. – С.556–567.
4. Данилов, А.М. Математическое и компьютерное моделирование сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Э.Р. Домке. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 296 с.
5. Будылина, Е.А. Моделирование с позиций управления в технических системах / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2 (16). – С. 138–142.
6. 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.

#### References

1. Andreev, A.N. Information models for designing conceptual broad-profile flight simulators / A.N. Andreev [etc.] // Measurement Techniques. August 2000. – Vol.43. Issue 8. – P.667–672.
2. Flight simulators modular architecture: monograph / E.V. Lapshin [etc.]; edited E.V. Lapshin, A.M. Danilov. – Penza: IPC PSU, 2005. – 146 p.
3. Eremkin, A.I. Industrial and aerospace applications of system methodologies, identification systems and control theory / A.I. Eremkin, A.P. Proshin, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Science and Technology. Selected works. – M.: Russian Academy of Sciences, 2005. – P.556–567.
4. Danilov, A.M. Mathematical and computer modeling of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina, E.R. Domke. – Penza: PGUAS, 2011. – 296 p.
5. Budylyna, E.A. Modeling from the positions of management in technical systems / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and construction. – 2013. – № 2 (16). – P. 138–142.
6. Danilov, A.M. Protection against shock and accompanying vibration: exponential-trigonometric approximation of functions / A.M. Danilov, I.A. Garkina, I.N. Garkin // Regional architecture and construction. – 2012. – № 3 (14). – P.85–89.

*Пензенский государственный  
технологический университет*

Россия, 440039, г. Пенза,  
пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11,  
тел.: (8412) 49-54-41; факс: (8412) 49-99-73

**Тарасов Денис Александрович**,  
аспирант кафедры «Теоретическая и  
прикладная механика»  
E-mail: den517375@ya.ru

**Коновалов Владимир Викторович**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Теоретическая  
и прикладная механика»  
E-mail: konovalov-penza@rambler.ru

**Зайцев Владимир Юрьевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Теоретическая  
и прикладная механика»  
Тел.: 8(841-2) 49-54-41

*Penza State Technological University*

Russia, 440039, Penza, 1a/11,  
Baydukova pr./ Gagarina St.,  
tel.: (8412) 49-54-41; fax: (8412) 49-99-73

**Tarasov Denis Alexandrovich**,  
Postgraduate of the department «Theoretical  
and Applied Mechanics»  
E-mail: den517375@ya.ru

**Konovalov Vladimir Viktorovich**,  
Doctor of Science, Professor of the  
department «Theoretical and Applied  
Mechanics»  
E-mail: konovalov-penza@rambler.ru

**Zaitsev Vladimir Yurievich**,  
Candidate of Science, Associate Professor,  
Head of the department «Theoretical and  
Applied Mechanics»  
Tel.: 8(841-2) 49-54-41

## КОНСТРУКЦИЯ ЗАЩИТНОГО СООРУЖЕНИЯ ОТ УДАРА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДОВ

Д.А. Тарасов, В.В. Коновалов, В.Ю. Зайцев

Предложено защитное сооружение на основе конструктивных решений свайных фундаментов. Дана оценка напряженно-деформированного состояния, а также представлены результаты натурного испытания предлагаемой конструкции.

*Ключевые слова: защита от удара, конструкция защитного сооружения, свайный фундамент, демпфер, снижение материалоемкости, упрощение монтажа.*

## PROTECTIVE STRUCTURE CONSTRUCTION FROM STROKE FOR RAILROAD CROSSINGS

D.A. Tarasov, V.V. Konovalov, V.Y. Zaitsev

Protective structure on the basis of pile foundation design is given. The estimation of stress-strain state, as well as the results of full-scale tests of the proposed structure are presented.

*Keywords: impact protection, design of protective structures, pile foundation, reducing the consumption of materials damper, installation simplifying.*

Пересечения железнодорожных путей и автомобильных дорог на одном уровне являются сложными и опасными элементами дорожной сети, оказывающими существенное влияние на эффективность эксплуатации и безопасность автомобильного и железнодорожного транспорта в целом.

В создавшихся условиях особую значимость приобретают вопросы обеспечения безопасности движения через железнодорожные переезды. Проблема железнодорожных переездов является актуальной не только для России, но и для большинства промышленно развитых стран.

На эксплуатируемых объектах внедряются специальные физические препятствия для недопущения выезда на переезд автомобильного транспорта.

Наиболее широкое распространение в качестве физического препятствия получили противотаранные устройства (ПТУ, барьер) шлагбаумного типа [1].

На рис.1 показан общий вид ПТУ [2], установленного на предлагаемую металлоконструкцию гашения импульса удара. Основными элементами ПТУ шлагбаумного типа, воспринимающими ударную нагрузку и передающими ее посредством силовых опор 1 на рассматриваемую металлоконструкцию 5, являются стальные канаты, расположенные внутри стрелы барьера 2.

Существующие на сегодняшний день строительные нормы и правила предусматривают устройство фундаментов под оборудование с динамическими нагрузками бетонными или железобетонными монолитными, сборно-монолитными и сборными, а при соответствующем обосновании – металлическими. Фундаменты, воспринимающие ударную нагрузку, следует проектировать массивными в виде монолитного блока или жесткой плиты. Для свайных фундаментов следует использовать железобетонные сваи сплошного сечения. При ударной нагрузке необходимо применять съемные фундаментные болты. Кроме того, предъявляется ряд жестких требований и ограничений по конструктивному армированию и минимальным габаритам фундамента [3].

Все это ведет к большой материалоемкости и, как следствие, к высокой себестоимости строительства.

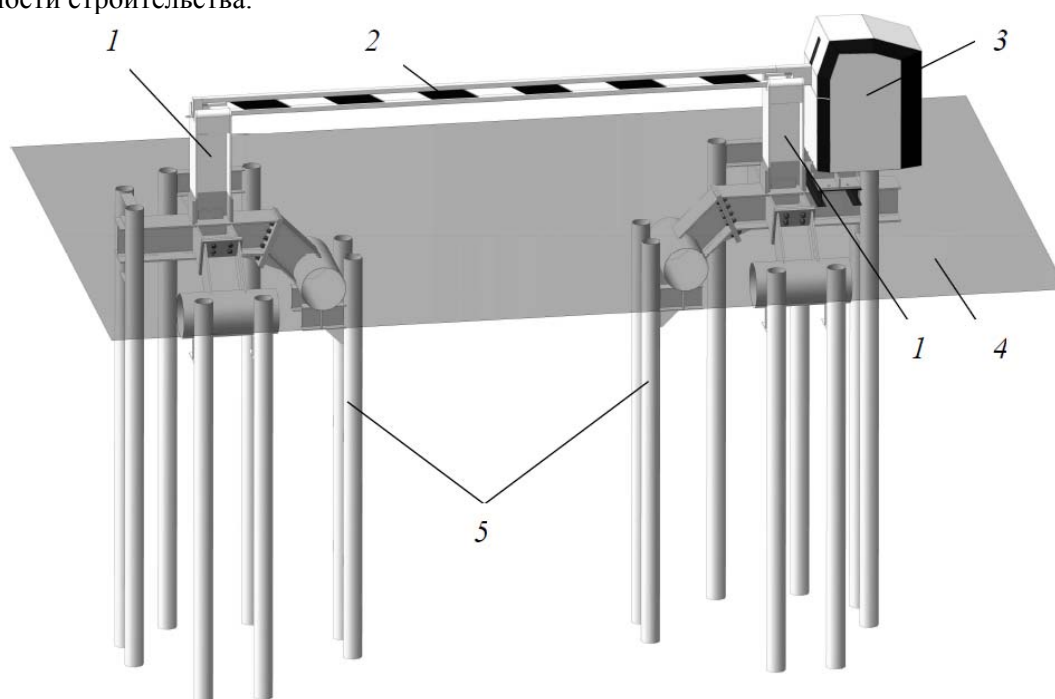


Рис. 1. Общий вид металлоконструкции гашения импульса удара с установленным на нее ПТУ: 1 – силовая опора барьера; 2 – стрела барьера; 3 – подъемный механизм барьера; 4 – уровень поверхности земли; 5 – металлоконструкция гашения импульса удара

Техническая задача, для решение которой предложен авторами металлический свайный фундамент [4], состоит в создании металлоконструкции гашения импульса удара, обеспечивающей снижение материалоемкости относительно традиционных монолитных железобетонных фундаментов на естественном основании.

Фрагмент конструкции представлен на рис.2. Конструкция включает сваи и ростверк. Сваи 9 и 10 выполнены в виде вертикально расположенных стальных труб. Одна часть свай, назовем их «не связанные» 9, в оголовке имеет опорные столики 8. Другая часть свай жестко связана попарно посредством стальных горизонтально расположенных балок 6 и 7, это сваи «связанные» 10.

Ростверк выполнен в виде системы Г-образных стальных балок 2 и 3. Система балок состоит из одной главной 2 и двух примыкающих к ней перпендикулярно второстепенных балок 3. Главная 2 и одна второстепенная балка 3 состоят из двух конструктивных элементов, соединенных между собой на фланцах 4, обеспечивающих жесткое сопряжение узлов конструкции. Другая второстепенная балка 3 представляет собой один конструктивный элемент, имеющий жесткое сопряжение с главной балкой 2.

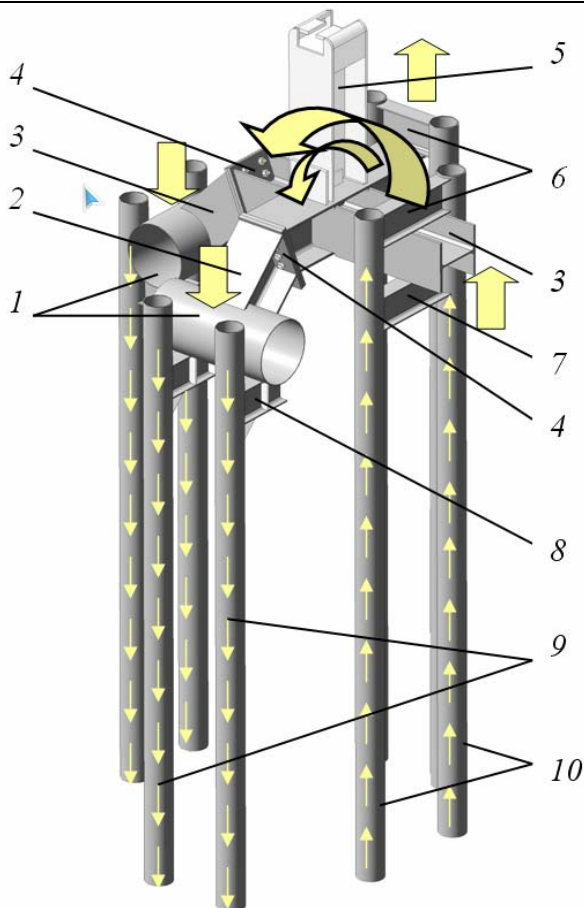


Рис. 2. Фрагмент металлоконструкции гашения импульса удара:

- 1 – демпфер; 2 – главная балка; 3 – второстепенная балка; 4 – фланцевое соединение;  
 5 – силовая опора ПТУ; 6 – верхняя объединяющая балка; 7 – нижняя объединяющая балка;  
 8 – опорный столик; 9 – сваи «не связанные»; 10 – сваи «связанные»

По двум сторонам система Г-образных стальных балок опирается демпферами 1, выполненными из стальных труб, на опорные столики 8 «не связанных» свай 9 без жесткой фиксации, образуя шарнирное соединение. По двум другим – главной балкой 2 и одной второстепенной 3 на нижние объединяющие балки 7 «связанных» свай 10. Эти узлы являются скользящими шарнирами.

Принцип работы данной металлоконструкции основан на преобразовании полученной ею энергии от ударной нагрузки в деформацию и разрушение материала.

Во время таранного удара главная балка 2 раскладывает изгибающий момент, передающийся от силовой опоры ПТУ 5, на пару сил. Одна сила посредством демпфера 1 на конце главной балки 2 и опорные столики 8 вдавливают «не связанные» сваи 9. Другая сила свободным концом главной балки 2 посредством верхней объединяющей балки 6 старается вырвать из грунта «связанные» сваи 10.

Во время таранного удара кроме изгибающего момента возникает поперечная сила, которая посредством демпфера 1 на конце главной балки 2 и опорные столики 8 изгибает «не связанные» сваи 9. В это время свободные концы главной балки 2 и одной второстепенной 3 проскальзывают между объединяющими балками 6 и 7 «связанных» свай 10.

Демпферы 1 на концах второстепенной 3 и главной балок 2 во время таранного удара деформируются первыми, так как имеют наименьшую жесткость в системе, тем самым преобразуя полученную ими энергию от ударной нагрузки в деформацию и разрушение материала.

Второстепенные балки 3 обеспечивают общую устойчивость главной балки 2 из плоскости действия динамической нагрузки.

Особенностью при использовании данной металлоконструкции является оценка инженерно-геологических условий площадки строительства. Определяется слой грунта, в который наиболее рационально заглубить острие свай 9 и 10, тем самым назначается их длина.

Специфична строгая последовательность монтажа, которая влияет на работоспособность системы ПТУ, – предлагаемая конструкция как единое целое.

Для определения действительного напряженно-деформированного состояния (НДС) и детального анализа работы металлоконструкции создана расчетная модель и проведен расчет методом конечных элементов (МКЭ).

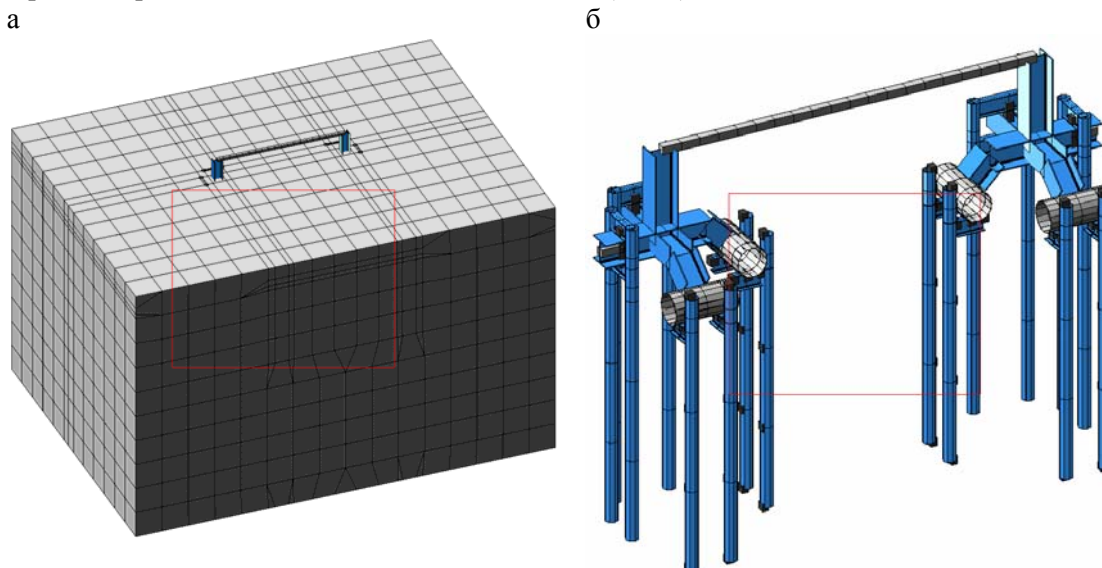


Рис. 3. Расчетная модель металлоконструкции гашения импульса удара совместно с грунтовым массивом:  
а – общий вид; б – фрагмент

Расчетная модель металлоконструкции гашения импульса удара совместно с грунтовым массивом, выполненная в программном комплексе «ЛИРА» версии 9.6 релиз R9, представлена на рис.3.

Моделирование свай, опорных столиков, объединяющих, главных и второстепенных балок, силовых опор выполнено с использованием универсального пространственного стержневого конечного элемента (тип 10), демпферов с использованием универсального прямоугольного конечного элемента оболочки (тип 41), стального каната с использованием геометрически нелинейного универсального пространственного стержневого конечного элемента (тип 310). Моделирование грунтового массива выполнено с использованием физически нелинейных объемных изопараметрических конечных элементов грунта (тип 274 и тип 276). Условия контакта элементов, образующих скользящие шарниры, заданы с помощью конечного элемента связи между узлами (тип 55). Воздействие таранного удара смоделировано равномерно-распределенной горизонтальной поперечной нагрузкой, приложенной по всей длине стального каната. Данная нагрузка определена с помощью элементарной теории удара, через усредненную величину силы импульса (удара). Расчет выполнен шаговым нелинейным процессором, предназначенным для решения физически и геометрически нелинейных, а также контактных задач [5].

Проведенный расчет методом конечных элементов позволил получить напряженно-деформированное состояние исследуемой конструкции. На рис.4 представлены результаты расчета.

Анализ деформаций и характер их распределения подтверждает предположение о восприятии большей части энергии удара «зонами программируемой деформации» вследствие преобразования полученной ими энергии в деформацию материала указанных элементов. В данной конструкции такими элементами являются демпферы.

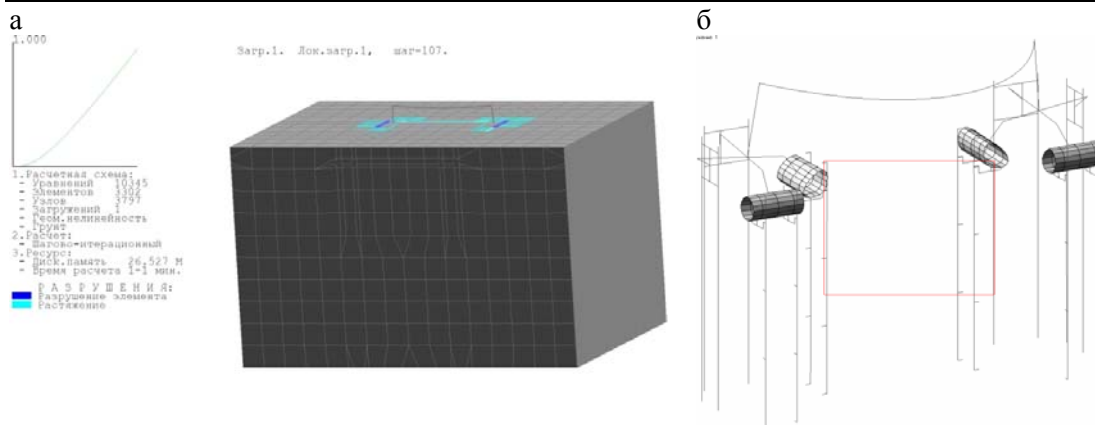


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние расчетной модели на 107 шаге нагружения, что соответствует 100 % величины внешней нагрузки:  
а – общий вид; б – фрагмент

В сентябре 2013 г. проведено натурное испытание предлагаемой металлоконструкции с установленным на нее ПТУ на территории испытательного центра НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» с целью подтверждения заявленных технических характеристик на изделия.

На рис.5 показан монтаж противотаранного устройства на рассматриваемую металлоконструкцию.

Требование, предъявляемое к объектам испытаний, заключалось в создании непреодолимого препятствия для автотранспорта массой до 3,5 т и скоростью движения до 40 км/ч при попытке несанкционированного въезда на охраняемую территорию объекта [6].

Испытание осуществлялось путем таранного удара по ПТУ, установленного на металлоконструкцию гашения импульса удара автомобилем ГАЗ-3307, массой 3,5 т, движущегося по поверхности дорожного покрытия со скоростью 40 км/ч.

Общие виды испытываемых изделий, а также автомобиля ГАЗ-3307, которым производился таранный удар, представлены на рис.6.

Для разгона автотранспортного средства (АТС) использовалась горизонтальная дорога с твердым (цементобетонным) покрытием шириной 6 м. Движение АТС в заданном направлении обеспечивалось прямолинейным монорельсом [6].

Разгон осуществлялся автомобилем-тягачом посредством тягового троса, системы подвижных и неподвижных направляющих блоков и ползуна, перемещающегося по монорельсу. Отделение АТС от ползуна осуществлялось автоматически на расстоянии 8 м от места возникновения контакта с ПТУ. Дальнейшее движение АТС происходило по инерции [6].

Скорость таранного удара автомобиля по ПТУ определялась посредством электронного прибора «время – путь» на расстоянии 8 м до места возникновения контакта с ПТУ [6].

Результаты испытания представлены на рис.7.

Рассмотренная металлоконструкция кроме снижения материалоемкости обладает рядом преимуществ относительно традиционных монолитных железобетонных фундаментов на естественном основании:

- При монтаже в разы уменьшается объем земляных работ, что приводит к снижению трудоемкости и стоимости строительства.
- Позволяет полностью отказаться от использования бетона и работ, связанных с его доставкой на объект строительства, устройством опалубки и укладкой.
- Противотаранное устройство, установленное на рассматриваемую конструкцию, готово к работе сразу после монтажа. Не требуется набора прочности бетона в связи с его отсутствием.
- Конструкция позволяет вести строительные-монтажные работы с минимальным вскрытием дорожного полотна и без остановки движения автотранспортных средств через перекрываемый проезд, так как представляет собой две независимые конструктивные части.





Рис. 5. Монтаж ПТУ на металлоконструкцию гашения импульса удара:  
а – общий вид; б – фрагмент



Рис. 6. Общий вид до испытания:  
а – объект испытания; б – автомобиль ГАЗ-3307



Рис. 7. Общий вид после испытания

Таким образом, разработанная металлоконструкция для ПТУ шлагбаумного типа работоспособна, а результаты теоретических исследований напряженно-деформированного состояния, проведенных методом конечных элементов, подтверждены натурными испытаниями.

## Список литературы

1. Крайнов, Г.М. Обзор российского рынка противотаранных устройств / Г.М. Крайнов // Системы безопасности. – 2012. – №4. – С. 68–72.
2. Патент №131741 РФ. Противотаранный барьер / А.А. Мальцев, Д.А. Тарасов, Н.А. Шалашилин, О.Л. Шаповал. – №2013105384/03; заявл. 08.02.2013; опубл. 27.08.2013, Бюл. №24. – 1 с.
3. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 32 с.
4. Патент №123425 РФ. Металлический свайный фундамент / В.Ю. Зайцев, В.В. Коновалов, Д.А. Тарасов, О.Л. Шаповал. – №2012133210/03; заявл. 03.08.2012; опубл. 27.12.2012, Бюл. №36. – 2 с.
5. Лира 9.4. Руководство пользователя. Основы / Е.Б. Стрелец-Стрелецкий, В.Е. Боговис, Ю.В. Гензерский [и др.]. – Киев: Изд-во «Факт», 2008. – 164 с.
6. Протокол № 1720/У0/У/У/86-13 испытаний противотаранного устройства облегченного типа ПТУ-Л «РЕРОНА Т1145» ДАБР.425728.002 автомобилем типа ГАЗ-3307. – п. Автополигон, Дмитровский район, Московская область: Испытательный центр НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», 2013. – 20 с.

## References

1. Krainov, G.M. Russian Market protivotarannyh devices / G.M. Extremely // Security Systems. – 2012. – № 4. – P. 68–72.
2. Patent number 131741 Russia. Protivotarannyi barier / A.A. Maltsev, D.A. Tarasov, N.A. Shalashilin, O.L. Shapoval. – № 2013105384/03; appl. 08.02.2013, publ. 27.08.2013, ВиН. Number 24. – 1.
3. SNIP 2.02.05-87. Foundations machines with dynamic loads / USSR State. – Moscow: USSR State TSITP, 1988. – 32.
4. Patent number 123425 Russia. Metal pile foundation / V. Zaitsev, V.V. Konovalov, D.A. Tarasov, O.L. Shapoval. – №2012133210/03; appl. 03.08.2012, publ. 27.12.2012, ВиН. Number 36. – 2.
5. Lyra 9.4. User Guide. Basics: Textbook. Benefit / E.B. Sagittarius-Strelets, V.E. Bogovis, Y. Genzersky [et al.]. – Kiev: Publishing House "fact", 2008. – 164.
6. Protocol N~ 1720/UO/W/W/86-13 tests protivotarannogo lightweight device type PTU-L «PREPONA T1145» DABR.425728.002 car type GAZ-3307. § avtopoligone, Dmitrov district, Moscow region: Testing Center NITSIAMT FSUE "us", 2013. – 20.

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

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

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

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

**Ладин Роман Акбарович**,  
магистрант 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

**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»

**Ladin Roman Akbarovich**,  
undergraduate of the department  
«Geotechnics and road construction»

## РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК СО СРЕДНИМ ПРОЛОТОМ СРЕЗА

О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин, Р.А. Ладин

Усовершенствован метод расчета прочности коротких железобетонных балок по расширению границ пролета среза.

*Ключевые слова: короткие железобетонные балки, схемы разрушения и трещинообразование, прочность.*

## STRENGTH CALCULATING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH MIDDLE SHEAR SPAN

O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornuhin, R.A. Ladin

Improved method for calculating the strength of short concrete beams on expanding the boundaries of shear span is given.

*Keywords: short reinforced concrete beams, circuit failure and fracture, strength.*

К настоящему времени не существует общепринятых методов расчета железобетонных балок со средним пролетом среза. В практике проектирования коротких элементов (пролет среза  $a/h_0 \leq 1$ ) широко используется метод расчета, базирующийся на стержневой модели [1]. Принятые ранее границы пролета среза остаются фактически неопределенными (недостаточно экспериментальных данных). Ниже рассмотрены методы расчета балок на основе экспериментальных данных, позволяющие увеличить пролет среза до 1,5.

Исследовалась действительная работа железобетонных балок при изменении пролета среза от 0,25 до 1,5 [2, 3]. Программа исследований предусматривала:

- определение прочности и трещиностойкости балок;
- определение ширины раскрытия трещин балок;
- определение влияния горизонтальных и вертикальных хомутов на прочность, трещиностойкость и ширину раскрытия трещин балок;
- определение влияния пролета среза на характер образования трещин, вид разрушения в балках без поперечной арматуры и в балках, армированных равномерно распределенной арматурой.

Для оценки действительной работы сжатой зоны коротких балок испытывали три серии образцов. Опытные образцы коротких балок проектировались прямоугольного сечения с размерами 25x40 см, длина образцов изменялась в соответствии с пролетом среза. Использовался бетон класса В 25, арматура класса А III. Всего испытано 10 образцов. Шесть образцов Б-1 – Б-6 армировались только продольной растянутой арматурой, исследуемым фактором являлся пролет среза  $0,25 \leq a/h_0 \leq 1,5$ . Образцы Б-9, Б-10 армировались горизонтальными, Б-7, Б-8 – 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  $\mu_s = 0,85\%$ .

Для оценки действительной работы растянутой зоны коротких балок использовали результаты испытаний Голландского института CUR, имеющие аналогичные геометрические и физические параметры. Исследуемым фактором являлось количество продольной арматуры  $\mu_s = 0,7-1,2\%$ , пролет среза  $a/h_0 = 0,5-1,5$ .

По результатам испытаний проводилась классификация трещин, определялись разрушающие усилия, а также усилия при образовании и развитии трещин при изменении основных факторов (рис.1).

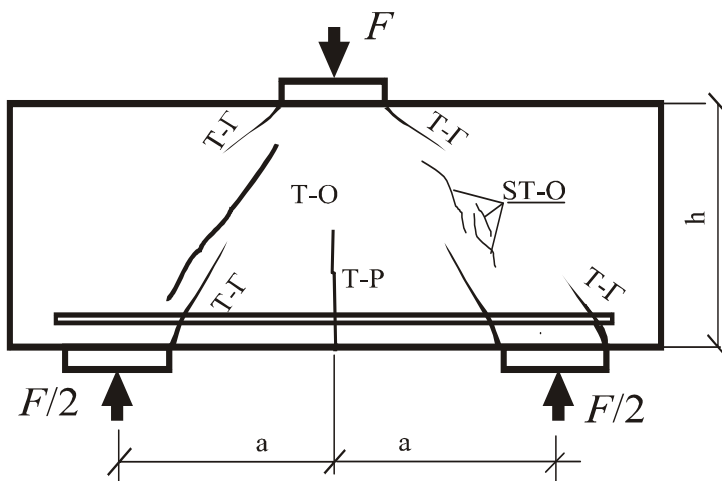


Рис. 1. Классификация трещин коротких балок

**Оценка напряженно-деформированного состояния коротких балок.** В балках с  $1 \leq a/h_0 \leq 1,5$  главные сжимающие напряжения концентрируются в наклонных участках, расположенных между грузовой и опорными площадками. Главные растягивающие напряжения концентрируются в горизонтальных участках, расположенных вдоль нижней грани балки. Оказалось, что при увеличении пролета среза снижается угол наклона главных сжимающих напряжений, уменьшается ширина наклонного участка, в пределах которого происходит концентрация главных сжимающих напряжений. Главные сжимающие напряжения увеличиваются у внутренней грани наклонного участка. Согласно напряженно-деформированному состоянию балок с  $a/h_0$  от 1 до 1,5, поверхность бетона можно разделить на характерные зоны. Первая зона представляет собой наклонную полосу, расположенную между грузовой и опорной площадками, в пределах которой концентрируются главные сжимающие напряжения. Вторая зона представляет собой горизонтальный участок в нижней части балки, в пределах которого концентрируются главные растягивающие напряжения. Третья и четвертая зоны располагаются с внутренней и с внешней стороны сжатого наклонного участка бетона и характеризуются малыми напряжениями (рис.2).

В балках с пролетом среза  $a/h_0$  от 1 до 1,5 выделилось четыре вида характерных трещин: наклонные трещины, выделяющие сжатую полосу бетона; вертикальные трещины в бетоне растянутой зоны; серия наклонных прерывистых трещин, характерная при раздавливании бетона, и наклонная трещина, проходящая по диагонали сжатой бетонной полосы (рис.1).

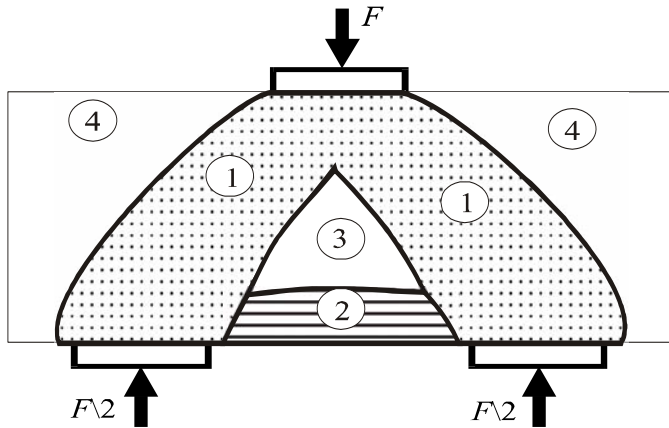
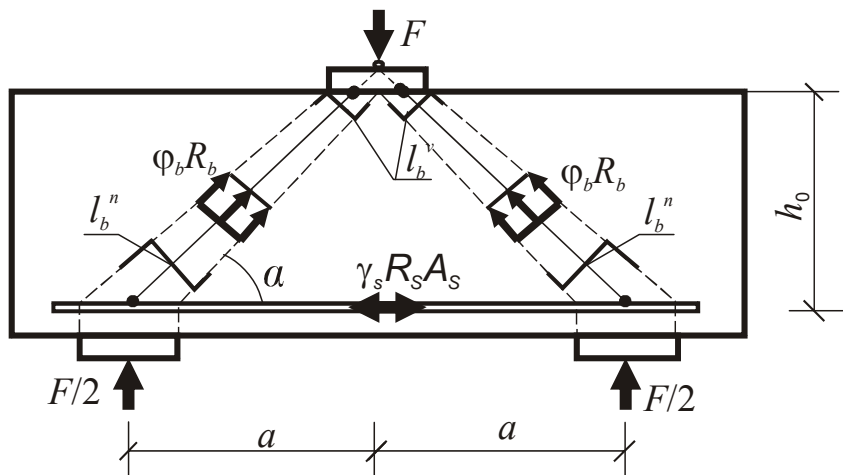


Рис. 2. Зоны напряженно-деформированного состояния коротких балок

В балках с пролетом среза  $a/h_0$  от 1 до 1,5 выявлено два вида разрушения: разрушение по наклонной сжатой бетонной полосе и по растянутому арматурному поясу. Методологические основы анализа и синтеза сложных многокритериальных систем достаточно полно указаны в [6–8].

Экспериментально авторами установлено, что закономерность изменения разрушающих усилий в балках с пролетом среза от 1 до 1,5 как по сжатой, так и по растянутой зонам гармонически продолжает соответствующие закономерности для балок с пролетом среза до 1. Для оценки работы балок с  $1 < a/h_0 \leq 1,5$  можно воспользоваться каркасно-стержневой моделью (рис.3) [1].


 Рис. 3. Каркасно-стержневая модель для определения прочности коротких балок при изменении пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 1,5

Сжимающее усилие определится в виде

$$S = 0,5F / \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $F$  – внешняя сила;  $S$  – сжимающее усилие в наклонном элементе модели;  $\alpha$  – угол наклона сжатой бетонной полосы, определяемый согласно расчетной модели;

продольное растягивающее усилие –

$$T_s = 0,5 F_s / \operatorname{tg} \alpha; \quad (2)$$

где  $F_s$  – внешняя сила;  $T_s$  – продольное растягивающее усилие в горизонтальном элементе модели.

Таким образом, при расчете прочности балок по сжатой и растянутой зонам при изменении пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 1,5 использован принципиальный подход к оценке прочности коротких балок с пролетом среза до 1.

Предельное состояние по сжатой зоне наступает при достижении сжимающими напряжениями предела прочности при сжатии  $\varphi_b R_b$ , а по растянутой – при достижении растягивающими напряжениями предела прочности  $\gamma_s R_s$ .

Для определения условия прочности балок с пролетом среза  $1 < a/h_0 \leq 1,5$  по сжатой и растянутой зонам предлагаются следующие расчетные зависимости:

$$S = S_b + S_{sw}; \quad (3)$$

$$S_b \leq \gamma_b \varphi_b R_b b l_b; \quad (4)$$

$$T_s \leq \gamma_s R_s A_s, \quad (5)$$

где  $S_b$  – сжимающее усилие расчетной бетонной полосы;  $S_{sw}$  – усилие в арматуре при ее прямом и косвенном участии в работе наклонной сжатой полосы бетона;  $\varphi_b$  – коэффициент, учитывающий влияние бетона, окружающего расчетную полосу.

Отличительной особенностью характера напряженно-деформированного состояния балок с пролетом среза от 0,75 до 1,5 является увеличение размеров растянутой зоны (зона 2, рис.2), а также зоны малых напряжений (зона 4, рис.2), что приводит к качественному и количественному влиянию указанных зон на работу сжатой наклонной бетонной полосы. Учесть указанные особенности позволяет коэффициент  $\varphi_b$ , который рекомендуем определять по зависимости (6). В этой зависимости учитывается влияние только верхней, малонапряженной зоны бетона (зона 4, рис. 2), окружающей расчетную полосу бетона.

$$\varphi_b = (A_{loc2} / A_{loc1})^{1/3}; \quad (6)$$

$\gamma_b, \gamma_s$  – коэффициенты, полученные на основе экспериментов;  $l_b$  – ширина расчетной бетонной полосы, определяемая по формулам (7), (8) согласно [1] и принимаемая меньшим из значений (при  $a/h_0 \geq 0,75$ );  $l_b \geq 0,8 l_{sup} \sin \alpha$ :

$$l_b^v = 0,5 \gamma_2 \varphi_b l_{sup}^v \sin \alpha; \quad (7)$$

$$l_b^n = \gamma_1 \varphi_b l_{sup}^n \sin \alpha, \quad (8)$$

где  $\gamma_1$  – коэффициент, учитывающий неравномерный характер распределения сжимающих напряжений у опоры [1];  $\gamma_2$  – коэффициент, учитывающий наличие арматуры в зоне передачи нагрузки [1].

### Выводы

1. Основную роль в сопротивлении коротких балок с  $a/h_0$  от 1 до 1,5, так же, как и в балках с  $a/h_0 \leq 1$ , играют главные сжимающие и главные растягивающие напряжения. При увеличении пролета среза снижается угол главных сжимающих напряжений, уменьшается ширина наклонного участка, в пределах которого происходит концентрация главных сжимающих напряжений.

2. В балках с пролетом среза  $a/h_0$  от 1 до 1,5 установлено четыре вида характерных трещин – наклонные трещины, выделяющие сжатую полосу бетона, вертикальные трещины в бетоне растянутой зоны, серия наклонных прерывистых трещин, характерных при раздавливании бетона, и наклонная трещина, проходящая по диагонали сжатой бетонной полосы.

3. В балках с пролетом среза  $a/h_0$  от 1 до 1,5 выявлено два вида разрушения – разрушение по наклонной сжатой бетонной полосе и по растянутому арматурному поясу.

4. Расширены границы применения каркасно-стержневой модели при увеличении пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 1,5.

5. Предложенные методы расчета прочности коротких балок без поперечной арматуры, а также балок с вертикальными и горизонтальными хомутами с приемлемой точностью описывают закономерность изменения разрушающей силы и хорошо согласуются с опытами. Среднее отклонение опытных и расчетных величин составляет 0,95–1,2 %.



6. Предложенный метод расчета прочности в значительной степени совершенствует процесс проектирования, обеспечивая экономию материалов бетона и арматуры, одновременно повышая надежность указанных конструкций за счет экспериментального обоснования.

#### Список литературы

1. 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.
2. Снежкина, О.В. Короткие балки. Моделирование физической работы: моногр. / О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 124 с.
3. Скачков, Ю.П. Определение схем разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок по экспериментальным данным / Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 74–81.
4. Снежкина, О.В. Экспериментально-теоретические исследования коротких железобетонных балок / О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин, Р.А. Ладин // Новый университет. Сер.: Технические науки. – 2013. – № 8–9 (18–19). – С. 53–56.
5. Скачков, Ю.П. Особенности напряженно-деформированного состояния коротких железобетонных элементов / Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин // Молодой ученый. – 2013. – № 12 (59). – С. 172–175.
6. Скачков, Ю.П. Модификация метода PATTEPH к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №1(10). – С.4–9.
7. 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.
8. 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.

#### References

1. 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.
2. Snezhkina, O.V. Short beams. Modelling of physical work: monogr. / O.V. Snezhkina, A.V. Kornyuhin, M.V. Kochetkova. – Penza: ПГУАС, 2011. – 124 p.
3. Skachkov, Y.P. Definition of schemes and destruction cracking short concrete beams experimental data / Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornyuhin // Regional architecture and construction. – 2013. – № 3. – С. 74–81.
4. Snezhkina, O.V. Experimental and theoretical studies of short reinforced concrete beams / O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornyuhin, R.A. Ladin // New University. Seriya: Engineering. – 2013. – № 8-9 (18-19). – С. 53–56.
5. Skachkov, Y.P. Features stress-strain state of short reinforced concrete elements / Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornyuhin // Young scientist. – 2013. – № 12 (59). – С. 172–175.
6. Skachkov, Y.P. Modification of the method of PATTEPH 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.
7. 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.
8. 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.

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

**Мальцев Алексей Викторович**,  
аспирант кафедры «Городское  
строительство и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Береговой Александр Маркович**,  
доктор технических наук, профессор  
E-mail: am@rambler.ru

**Береговой Виталий Александрович**,  
доктор технических наук, доцент  
E-mail: vabereg@rambler.ru

**Дерина Мария Александровна**,  
аспирант кафедры «Городское  
строительство и архитектура»  
E-mail: gsia @ pguas.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Maltsev Alecsei Victorovitch**,  
Postgraduate of the department «Urban  
construction and Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Beregovoy Aleksandr Marcovich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
E-mail: ambereg@rambler.ru

**Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich**,  
Doctor of Sciences, Associate Professor  
E-mail: vabereg@rambler.ru

**Derina Marya Alecsandrovna**,  
Postgraduate of the department «Urban  
construction and Architecture»  
E-mail: gsia @ pguas.ru;

## НАРУЖНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ, УТИЛИЗИРУЮЩЕЕ ТЕПЛО УХОДЯЩЕГО ВОЗДУХА ИЗ ПОМЕЩЕНИЯ

А.В. Мальцев, А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина

Рассмотрен вариант подогрева приточного воздуха в наружной стене, имеющей вентилируемую прослойку в своей конструкции. Представленная расчетная модель основана на утилизации части теплового потока, проходящего через наружное ограждение. Предложенный способ дает возможность повысить температуру приточного воздуха и, таким образом, обеспечить энергосберегающий эффект.

*Ключевые слова: наружное ограждение здания, вентилируемая воздушная прослойка, утилизация тепла, конвективный теплообмен.*

## ENCLOSURE STRUCTURES UTILIZING REMOVED ROOM AIR HEAT

A.V. Maltsev, A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, M.A. Derina

The variant of the continual heating of air inflow in the external wall with ventilated air space is considered. Analytical model rests on the utilization of the part of heat transfer, running through the enclosure structure due to the temperature difference between room and atmosphere air. The suggested method enables to increase the temperature of inflowing air and provide energy saving.

*Keywords: enclosure structure of building, inflowing air space, heat utilization, convective heat transfer.*

При проектировании и строительстве зданий используются различные способы энергосбережения, такие, как применение эффективных теплоизоляционных материалов, рекуператоров тепла, гелиоустановок и т.д. Подобные мероприятия, как правило, отличаются высокой стоимостью, поэтому поиски более дешёвых и эффективных по экономии тепловой энергии решений – одна из главных задач, решаемых в процессе проектирования энергоэффективного здания.

Авторами работ [1, 2, 3] исследованы процессы тепло-массопереноса в наружных ограждениях зданий и структурные параметры строительных материалов, обеспечивающие энерго-ресурсосберегающий эффект.



Опыт эксплуатации зданий показывает, что наружные ограждения с вентилируемыми воздушными прослойками превосходят сплошные конструкции по энергоэффективности и к тому же имеют меньшую массу. Ещё в 70-е годы прошлого столетия ЦНИИЭПжилища разработал ограждающие конструкции с однократным и многократным движением воздуха, двухслойные керамзитобетонные панели с вентилируемым крупнопористым слоем, легкие навесные панели с вентилируемой прослойкой. Последняя в этих и других подобных конструкциях обычно располагается в её толще и может вентилироваться наружным воздухом с выходом в помещение. При этом происходит утилизация части теплового потока и возникает энергосберегающий эффект, величина которого зависит от целого ряда геометрических и теплоэнергетических параметров (поперечного сечения и длины прослойки, её месторасположения в конструкции, температур наружного и внутреннего воздуха, скорости его движения, коэффициента теплообмена и др.).

Однако задача нестационарной теплопередачи через наружное ограждение с вентилируемой воздушной прослойкой решается сложным путём на основе дифференциальных уравнений теплопроводности с использованием метода конечных разностей. Значительно упростить эту задачу удалось Богословскому В.Н., который решил систему уравнений теплового баланса для элемента  $dx$  наружного ограждения и ввёл понятие среднесуточных значений температуры воздуха  $t_x$  в сечении  $x$  прослойки. Основанная на понятии величины  $t_x$  была разработана и решена расчётная модель по утилизации тепла верхних слоёв земли в вентилируемых подземных каналах [4].

Выполненный нами анализ месторасположения воздушной прослойки показал, что более интенсивный теплообмен между воздухом помещения и прослойки будет происходить при её размещении со стороны внутренней поверхности наружного ограждения, где тепловой поток наибольший, а термосопротивление разделяющей перегородки незначительное. С целью минимизации термосопротивления конструкция перегородки должна быть принята в виде тонкой пластины.

Недостатком такого способа устройства воздушной прослойки является появление в холодный период года обильного конденсата на поверхности пластины со стороны помещения и большая вероятность последующего её обледенения вблизи входа наружного воздуха. Для предотвращения столь неблагоприятного ухудшения санитарно-гигиенических условий эксплуатации была принята следующая конструкция прослойки: её форма представляет собой канал на внутренней поверхности наружной стены; канал закрыт пластиной из металлического листа, имеющего практически не учитываемое в расчётах термосопротивление; у задней стенки канала предусмотрен термовкладыш с целью компенсации потери общего сопротивления теплопередаче стены.

Поступивший в прослойку наружный воздух движется с заданной скоростью, регулируемой расположенным у выхода из прослойки вытяжным вентилятором. Приточное отверстие канала закрывается заглушкой с помощью механического или электрического привода, когда температура наружного воздуха падает ниже нуля. При необходимости может открываться отверстие канала с внутренней стороны стены. Со стенки канала в водоёмную напольную ёмкость стекает конденсат, при испарении которого уменьшается сухость воздуха отапливаемого помещения.

Исходя из этого, область применения рассмотренной ниже расчётной модели ограничена положительными температурами наружного воздуха  $t_n \geq 0^\circ\text{C}$ ; математическое описание этой модели состоит из следующей системы уравнений, основанной на вышеупомянутом понятии среднесуточной температуры  $t_x$  воздуха в прослойке:

$$t_x = t_c - (t_c - t_n) \cdot e^{-Ax}, \quad (1)$$

где

$$t_c = C_0 / D_0. \quad (2)$$

Параметры  $C_0$  и  $D_0$  являются комплексными оценочными критериями, связанными с коэффициентами теплообмена и термическими сопротивлениями конструктивных слоёв наружного ограждения. Параметр  $A$  из уравнения (1) определяется по формуле

$$A = \alpha_k \cdot D_0 / (G \cdot c), \quad (3)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена между воздухом в прослойке и её поверхностями:

$$\alpha_k = 3,25 \cdot \delta_{\text{пр}}^{-0,2} \cdot v_{\text{пр}}^{0,8}, \quad (4)$$

здесь  $\delta_{\text{пр}}$  – высота прослойки, м;  $v_{\text{пр}}$  – скорость движения воздуха в прослойке, м/с;  $G$  – количество воздуха, проходящего через прослойку:

$$G = v_{\text{пр}} \cdot \rho \cdot \delta_{\text{пр}} \cdot \delta_{\text{пр}}^I, \quad (5)$$

здесь  $\rho$  – плотность приточного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta_{\text{пр}}^I$  – ширина прослойки, м;  $c$  – удельная теплоёмкость воздуха,  $c = 1005$  Дж/(кг·°C).

Оценку энергоэффективности использования данного способа утилизации тепла производили для 10-этажного здания, имеющего в конструкции наружной стены воздушную прослойку длиной  $l_{\text{пр}} = 30$  м (рис.1,а). Воздух, прошедший по всей прослойке, попадает в квартиру, расположенную на 10-м этаже и имеющую геометрические размеры  $9,6 \times 6 \times 3$  м. Конструктивное решение стены представлено на рис.1,б.

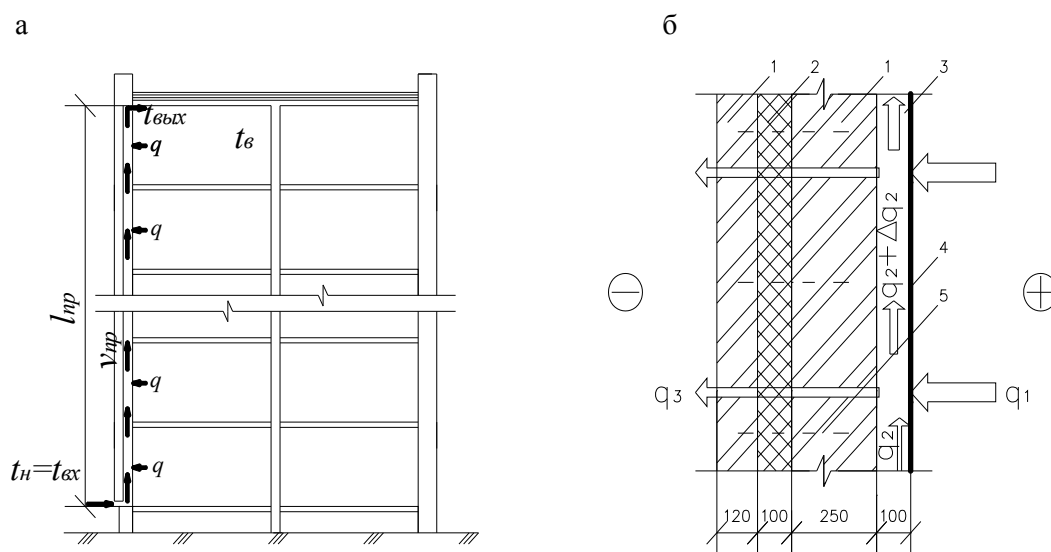


Рис.1. Схема утилизации тепла:

а – в здании; б – в наружной стене;

1– кирпичная кладка; 2– минеральная вата; 3 – воздушная прослойка;

4 – алюминиевая пластина толщиной 1 мм; 5 – гибкие связи

В расчётной модели были приняты: температура наружного воздуха  $t_n = +1$  °C, температура помещения  $t_b = +20$  °C, объём приточного воздуха принят равным  $172,8$  м<sup>3</sup>/ч (он обеспечивает нормативный воздухообмен в объёме  $3$  м<sup>3</sup> воздуха на  $1$  м<sup>2</sup> площади помещения в час), скорость движения воздуха в прослойке  $v_{\text{пр}} = 0,4$  м/с, сечение канала  $1,2 \cdot 0,1$  м ( $0,1$  – толщина  $\delta$  воздушной прослойки).

При расчете найдены:

коэффициент конвективного теплообмена между воздухом в прослойке и её поверхностями по формуле (4)

$$\alpha_k = 3,25 \cdot 0,1^{-0,2} \cdot 0,4^{0,8} = 2,47 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C});$$

среднесуточные значения температуры воздуха  $t_x$  в сечении  $x$  прослойки (см. таблицу) по формуле (1)

$$t_x = 18,9 - (18,9 - 1) \cdot e^{-0,043x};$$

значения оценочных критериев для определения величины  $t_c$

$$C_0 = 22,2 \text{ °C}; D_0 = 1,18;$$

количество воздуха  $G$ , проходящего через прослойку, для нахождения параметра  $A$  в формуле (1)

$$G = 0,4 \cdot 1,3 \cdot 0,1 \cdot 1,2 = 0,067 \text{ кг/с,}$$

параметр  $A$  по формуле (3)

$$A = 2,47 \cdot 1,18 / (0,067 \cdot 1005) = 0,043.$$

Основным показателем при определении эффективности предложенного способа утилизации тепла наружным ограждением принимается значение температуры  $t_x$  в любом сечении воздушной прослойки. Для более подробного рассмотрения изменения температуры  $t_x$  по длине прослойки ее разделили на шесть равных частей, в каждой из которых определили температуру воздуха (см. таблицу и рис.2).

Т а б л и ц а

Изменение температуры воздуха  $t_x$  по длине прослойки

Параметры	Температура воздуха в прослойке $t_x$ , °С, при расстоянии $x$ , м, от входа в прослойку и при скорости движения воздуха $v = 0,4$ м/с						
$x$ , м	0	5	10	15	20	25	30
$t_x$ , °С	1	4,5	7,2	9,5	11,3	12,8	14

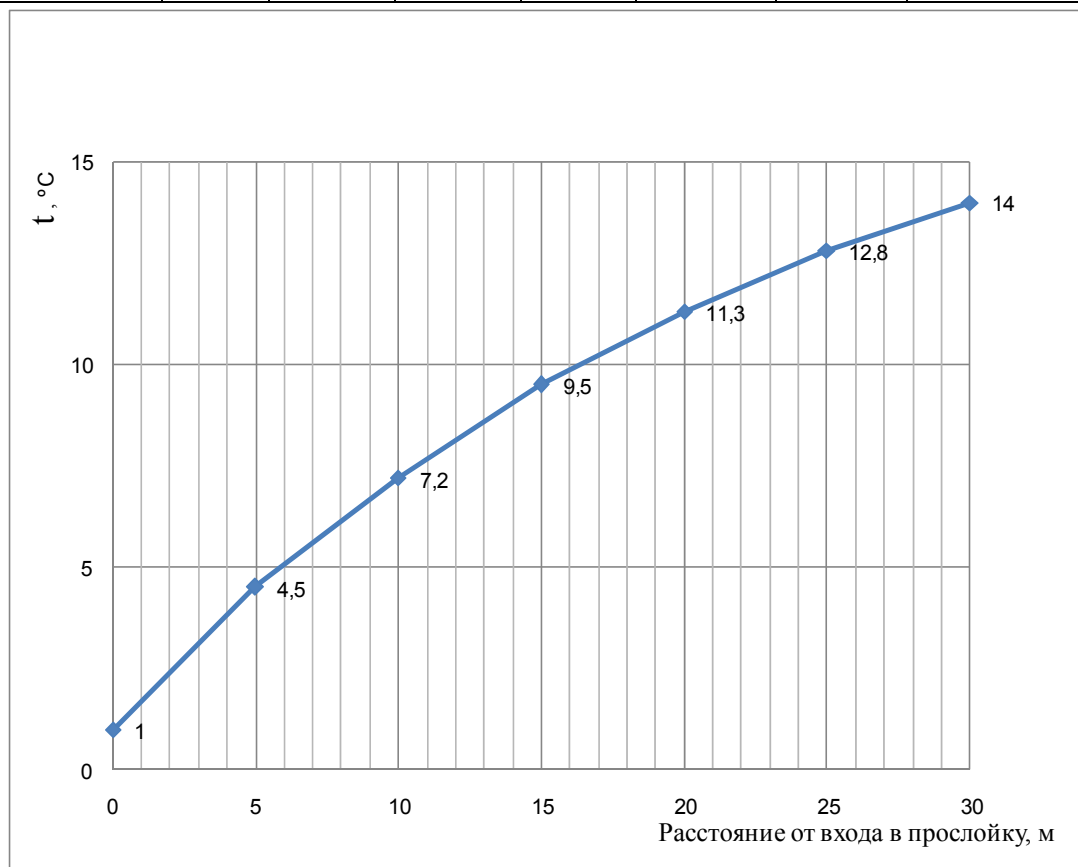


Рис.2. Зависимость температуры воздуха  $t_x$  в воздушной прослойке от расстояния  $x$  до входа в прослойку

Данные, приведенные в таблице и на рис.1, показывают, что при поступлении в воздушную прослойку наружного воздуха с температурой  $+1$  °С и при прохождении им всей ее длины, равной 30 м, температура приточного воздуха  $t_x$  составляет  $+14$  °С. Подогретый до этой температуры вентиляционный воздух обеспечивает воздухообмен только одного помещения на верхнем этаже. Аналогичные каналы могут быть устроены для ряда других помещений этого и более нижних этажей. Расчеты свидетельствуют о том, что хотя с уменьшением высоты прослойки величина  $t_x$  снижается,

однако для верхних этажей здания она остается достаточно высокой, составляя, например, для 9 и 8 этажей соответственно 13,3 и 12,5 °С.

Предлагаемый способ утилизации уходящего теплового потока наружным ограждением дает возможность уменьшить количество тепла на подогрев приточного вентиляционного воздуха, поступающего не из традиционных приточных отверстий (через форточки, фрамуги и т.п.), а из воздушной прослойки наружного ограждения.

#### Список литературы

1. Береговой, А.М. 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 // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С.140–144.
2. Езерский, В.А. Влияние вентилируемого фасада на теплозащитные качества утеплителя / В.А. Езерский, П.В. Монастырев // Жилищное строительство. – 2003. – №3. – С.18–20.
3. Ерофеев, В.Т. Композиционные строительные материалы на активированной воде затворения / В.Т. Ерофеев, Е.А. Митина, А.А. Матвиевский, Д.В. Емельянов, П.В. Юдин // Строительные материалы. – 2007. – №11. – С. 56–58.
4. Береговой, А.М. Энергосбережение в индивидуальном жилом доме при использовании тепла верхних слоёв земли / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Известия вузов. Строительство. – 2008. – №10. – С. 54–58.

#### References

1. Beregovoi, A.M. 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 // Regional architecture and engineering. – 2013. № 3. – P. 140–144.
2. Ezerskiy, V.A. Influence of ventilated facade on the thermal performance qualities of heat insulation / V.A. Ezerskiy, P.V. Monastirev // House building. – 2003. – № 3. – P. 18–20.
3. Erofeev, V.T. Composition building materials on activated water / V.T. Erofeev, E.A. Mitina, A.A. Matvievsciy, A.K. Osipov, D.V. Emelianov, P.V. Yudin // Building materials. – 2007. – №11. – P. 56–58.
4. Beregovoy, A.M. The energy saving in individual dwelling house on utilization of heat of earth upper layers / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy // News of higher educational institutions. Construction. – 2008. – №10. – P. 54–58.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Гусев Николай Иванович**,  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Управление качеством  
и технологии строительного производства»  
Тел.: (8412) 92-69-29

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

**Паршина Ксения Сергеевна**,  
студентка гр. АРХ-41

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

**Gusev Nikolai Ivanovich**,  
Candidate of Sciences, Professor of the  
department «Quality management and  
Technology of construction production»  
Tel.: (8412) 92-69-29

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

**Parshina Ksenia Sergeevna**,  
student of group ARH-41

## ИЗ ОПЫТА РЕСТАВРАЦИИ СТАРЫХ ЗДАНИЙ

Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, К.С. Паршина

Даны рекомендации по выбору рациональных методов выполнения дорогостоящих реставрационных работ и применения оптимальных малярных составов. Предлагается горизонтальная и отсечная гидроизоляция стен.

*Ключевые слова: реставрация старых зданий, горизонтальная и отсечная гидроизоляция стен, качество реставрации, материалы для реставрации, малярные составы.*

## EXPERIENCE IN RESTORATION OLD BUILDINGS

N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, K.S. Parshina

Some recommendations on the choice of the most reasonable methods of doing costly works in restoration and application of optimal painting compositions are given. Horizontal and shut off walls hydroisolation is offered.

*Keywords: restoration of old buildings, and the shut-off horizontal waterproofing walls, restoration quality, materials for restoration, painting compositions.*

Стоимость реконструкции старых зданий зависит от их технического состояния на момент реконструкции и может достигать величин, превышающих стоимость единицы объема или полезной площади вновь возводимых зданий аналогичного назначения.

При восстановлении прежнего облика ветхого здания необходимо предусматривать обеспечение последующей его эксплуатационной надежности и долговечности; усиление фундаментов стен и перекрытий, исходя из еще сохранившейся несущей способности. Сложные дорогостоящие фасадные работы, а также обновление интерьеров позволяет ликвидировать одну из типичных ошибок при реконструкции, заключающуюся в том, что, стремясь удержать штукатурку на выветрившейся кирпичной стене, увлажненной грунтовыми водами, применяют оштукатуривание жирными, прочными цементными растворами, что дает лишь отрицательный эффект. Такой раствор имеет коэффициент линейного расширения значительно больший, чем кирпичное основание. Эта разница тем больше, чем прочнее раствор. Поэтому следует применять более «мягкие» известково-цементные растворы с анкерровкой штукатурного слоя к слабой стене с помощью сетки и костылей.

Ошибки в проектировании и исполнении оконных и карнизных свесов, примыканий к водоприемным воронкам, небрежное выполнение и закрепление водосточных труб приводит к разрушению карнизных и подоконных частей зданий, имеющих, как правило, дорогостоящие лепные или штукатурно-тянутые элементы.

Одной из основных задач при производстве реконструкторских работ является восстановление горизонтальной гидроизоляции. Это весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс. Но без его выполнения реконструкция просто теряет смысл.

Причиной нарушения работы горизонтальной гидроизоляции в стенах является изменение ее положения относительно уровня наружной отмостки или тротуара, а также уровня полуподвала. Изоляция должна быть выше этих уровней, однако со временем она оказывается ниже. Происходит это из-за долговременных, доходящих до нескольких десятков сантиметров наслоений в окружающем здании рельефе. Вследствие этого стены начинают подпитываться грунтовой сыростью. Под воздействием капиллярного давления вода поднимается вверх по материалу стены и штукатурке. При этом, чем мелкопористее, однороднее материал стены, имеющий весьма мелкие капилляры, тем больше капиллярное давление и тем выше поднимается влага – иногда до нескольких метров. Старинный кирпич обладает именно такой мелкопористой однородной структурой.

Выполнить горизонтальную гидроизоляцию вновь трудно и дорого. Однако на современном техническом уровне возможно эффективное решение этой проблемы, в частности, путем использования электроосмоса, системы дренажей и т.п.

Горизонтальную гидроизоляцию необходимо сделать заново по периметрам всех стен. Такую изоляцию можно выполнить отдельными захватками по 2,5–3 м. Для этого в кладке нужно проделать горизонтальные пропилы на всю толщину стены с помощью несложной баровой машины. В получившуюся щель вводят, например, лист нержавеющей стали или двухслойный лист рулонного кровельного материала типа «рубитекс». Затем следует заполнить шов цементным раствором под давлением или торкретбетоном. Работа непростая, но без её выполнения заниматься восстановлением здания бесполезно.

Правильным решением может оказаться и устройство так называемой отсечной гидроизоляции. Она может значительно сократить и даже полностью исключить поднятие капиллярной влаги материалом цоколя здания. Это поможет исключить намокание нижней части стен в зданиях с нарушенной горизонтальной изоляцией или значительно уменьшить эффективность работы вследствие исключения гидроизоляции из работы по причине поднятия планировочной отметки отмостки вокруг здания выше заложённой в стене исправной гидроизоляции.

Отсечную изоляцию выполняют путем устройства сверлением ряда шпуров в существующем цоколе здания с последующим закачиванием в шпур, расположенные с наклоном в 30–40°, с шагом 200–250 мм, кремнийорганической жидкости, обладающей гидрофобными свойствами. В последующем шпур заполняют тампонажным раствором. Гидрофобный состав, пропитывая поры материала цоколя, отвердевает и формирует водонепроницаемый экран, исключая поднятие капиллярной влаги. Цоколь просушивается, и штукатурка или облицовка на его поверхности не размораживаются.

Для выполнения работ по устройству отсечной гидроизоляции поверхностей старых зданий следует привлекать специализированные фирмы, обладающие соответствующим опытом и располагающие надежными материалами и техническими средствами.

Своевременно выполненная, эффективно работающая вентиляция, отреставрированная кровля, правильное совмещение и последовательность в выполнении технологических строительных процессов позволяют вернуть реставрируемым зданиям утерянный ими первозданный внешний облик.

Перемены, происшедшие за последние годы в России, ведут к изменению духовного мира значительной части ее граждан. Возрождение старых, почти утраченных традиций бытия способствует воссозданию различных религиозных конфессий, их укреплению и развитию, а это, в свою очередь, вызывает необходимость строительства новых или восстановления старинных, почти полностью разрушенных зданий культового назначения. Надлежащего опыта в этой специфической области строительства практически нет ни у проектировщиков, ни у производителей. Но с трудностями нового строительства церквей, мечетей, синагог справиться проще. Сложнее обстоит дело с восстановлением зданий, разрушенных человеком и природой за последние 80 лет. Здания эти, в ряде случаев, еще крепки стенами. Но и ветхие сооружения уничтожать неразумно, а иногда и невозможно по причине их архитектурной и исторической значимости, или по религиозной сущности, когда верующие говорят, что здание и место, на котором оно стоит, «намоленные и их сносить нельзя».

Культовое строительство во всем мире, во все времена отличалось высоким качеством строительных работ. Недаром, когда хотят подчеркнуть добротность строения

или его части, то говорят: «Сделано, как в церкви!». Видимо, эта добротность и берегла многие храмы от полного разрушения. Вот почему традиция высокого качества постройки храмов обязана сохраниться при их восстановлении. Необходимо использовать все достижения современной строительной науки, применять новые долговечные материалы, новые технологии, не нарушая при этом традиционных требований, предъявляемых к их внутреннему и внешнему облику. Вместе с тем очевидно, что первоначальный вид можно воссоздать лишь применяя ныне устаревшие технологические приемы, т.е. мокрую штукатурку, профильные тяги, лепнину и многое другое. Новые современные материалы, как и новые методы работ, не должны ухудшать эксплуатационные достоинства старинных сооружений, например не должны искажать акустику существовавших куполов и приделов, их освещенность и др.

Обследование ряда старинных храмов и, в частности, храма Воскресения Христова в городе Пензе выявили три главных компонента, определяющих возможность восстановления культового здания.

Во-первых, сильно изменилась вертикальная планировка. Так, вокруг храма Воскресения Христова рельеф оказался поднятым выше уровня горизонтальной гидроизоляции стен более чем на 1 м.

Во-вторых, горизонтальная гидроизоляция стен, как правило, полностью выключена из работы вследствие её погружения в наслоения грунта и вследствие естественного разрушения материала изоляции, которая выполнялась, например, из бересты.

В-третьих, весьма значительно снизилась прочность каменной кладки. Невысокая исходная прочность кирпича и кладочного раствора не могли противостоять многолетнему систематическому увлажнению их грунтовой сыростью из-за неработающей гидроизоляции и атмосферной влагой – из-за протекания кровли, а чаще всего по причине ее отсутствия.

При разработке и осуществлении проектов восстановления храмов следует обеспечивать первоначальные планировочные отметки вокруг здания в максимально возможных удалениях от него. Появившиеся новые здания, дороги, проезды и т.п. целесообразно обрамить подпорными стенками со ступенями или пандусами для пешеходов и транспорта.

При восстановлении каменной кладки нужно учесть, что отдельные её части очень слабые. Их следует удалить и заменить новой кладкой. Это несложно. Значительно труднее восстановить небольшие участки кладки, выполненные под расшивку, да еще с применением фигурного кирпича в наличниках или поясах. Такой кирпич вытесывали, а потом обтачивали вручную по заданной геометрии. Старый кирпич был более однородным по составу да и по цвету, и из него легче было выполнить фигурный элемент. Из современного кирпича качественную фигурную подгонку к старой кладке выполнить практически невозможно, тем более у него и размеры иные, чем у старого. Поэтому в зданиях под расшивку старую кладку можно заменить новой лишь на значительных площадях стен. В противном случае придется применять наружную штукатурку, покрывая ею и здоровые, сохранившиеся участки стен. Только обязательно при этом нужно сделать насечку по их поверхности, а лучше по всем стенам натянуть и закрепить штырями металлическую сетку.

Еще одно важное условие, которое нельзя обойти, связано с материалами для проведения реставрации памятников архитектуры, и в частности – церковных зданий. В наши дни на реставраторов буквально обрушился шквал информации о современных строительных технологиях и материалах, которые привозят к нам из-за рубежа или производят отечественные предприятия. Но требования к строительным и реставрационным материалам далеко не одинаковы. Другими словами, то, что хорошо для вновь возводимого объекта, совершенно не подходит для реставрируемого храма, построенного, скажем, в XVII или XVIII веках. Это легко понять на примере фасадных красок. Современные составы, предназначенные для декоративно-защитной отделки фасадов, ориентированы на длительную эксплуатацию даже в неблагоприятных экологических и климатических условиях. Но применительно к реставрации есть такое правило: материал должен быть обратимым. Это значит, что в случае проведения некачественной реставрации, при необходимости внесения каких-то изменений в связи с вновь проведенными историко-архивными изысканиями или просто в силу того, что с течением времени появились более совершенные реставрационные технологии – при-

мененные ранее реставрационные составы должны быть легко и безболезненно для памятника удалены. А новейшие фасадные покрытия, рассчитанные на 10–20 лет службы, обладают высочайшей адгезией к основанию и счищать их со стены приходится вместе со штукатуркой. Другая особенность реставрации — сохранение исторически достоверного облика храма. Для фасадов русских церковных построек XVII–XVIII веков был характерен мягкий колорит, получаемый в результате разбеливания известью минеральных пигментов, так называемых «земель», добываемых карьерным способом.

Что касается современных наружных покрытий, то их в массе своей отличают ненатуральные цветовые тона, которые придают краскам синтетические пигменты. Несмотря на то, что представители производящих фирм предлагают услуги по колеровке белых базовых красок в самые различные тона, это не помогает найти то, что нужно реставраторам. Не спасает даже ультрафиолет – новые фасадные краски не изменяют цветовой тон и его насыщенность в течение многих лет. А вот пример, демонстрирующий прямо противоположные требования к реставрационным составам. При исправлении дефектов поверхности фасадных изразцов иногда практикуют восполнение утрат специальными растворами с последующей росписью цветными эмалями на основе синтетических смол. Такой способ реставрации достаточно технологичен и позволяет добиться убедительного визуального эффекта, который, однако, сохраняется весьма непродолжительно. Кроме того, учитывая разницу в степени паропроницаемости материала подлинника и ремонтных составов, при отрицательных внешних температурах внутри изразца будет развиваться избыточное давление, что приведет к отрыву наружной пленки вместе с поверхностными слоями керамической основы.

Следовательно, для реставрации нужны материалы, которые, во-первых, не причинят ущерб памятнику, во-вторых, имея в виду возраст исторической постройки и стоимость реставрационных работ, будут сохранять свои свойства в течение минимум 100 лет.

Очевидно, что главная специфика реставрационных материалов – в противоречивости требований, которым они должны соответствовать. Для того чтобы понять, насколько свойства того или иного реставрационного материала сбалансированы и совместимы с историческими материалами памятника, необходимо провести доскональный анализ их состояния и убедиться в том, что данная сухая кладочная смесь или фасадное покрытие действительно соответствует задачам реставрации конкретного объекта. Сейчас в Москве и Санкт-Петербурге есть специализированные учреждения, которые занимаются исследованием свойств и сертификацией строительных и отделочных материалов. Но оплатить эти услуги в состоянии лишь крупные фирмы-поставщики, которые реализуют строительную продукцию в значительных объемах. А при восстановлении маленького объекта, для которого нужна всего одна бочка извести, трудно оплатить работу по исследованию ее состава на предмет соответствия специфическим требованиям реставраторов. Сегодня возникла насущная необходимость в единой специализированной государственной структуре, которая взяла бы на себя поиск и подбор материалов для реставрации, их оценку, систематизацию и выработку рекомендаций по применению.

#### Список литературы

1. Гусев, Н.И. Особенности реставрации культовых зданий / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, К.С. Паршина // Наука и образование: Проблемы развития строительной отрасли: тр. междунар. науч. конф. – Пенза: ПГУАС, 2012. – С.52–54.
2. Гусев, Н.И. Качество реконструкции зданий / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова // Современное состояние и перспективы развития строительной отрасли: тр. междунар. науч. конф. – Пенза: ПГУАС, 2011. – С.111–113.

#### References

1. Gusev, N.I. Features restoration of religious buildings / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, K.S. Parshina // Science and Education: Problems of development of the construction industry: tr. mezhdunar. nauch. conf. – Penza: PGUAS, 2012. – P.52–54.
2. Gusev, N.I. Quality remodeling / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova // Current state and prospects of development of the construction industry: tr. mezhdunar. nauch. conf. – Penza: PGUAS, 2011. – P.111–113.



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

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ КРАНОВЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ КРУЧЕНИИ

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

Показано влияние увеличения моментов инерции крановых рельсов при кручении на выносливость подкрановых балок. Исследуется вопрос увеличения момента инерции рельса при кручении.

*Ключевые слова: крановый рельс, момент инерции, жёсткость при изгибе.*

## METHOD OF INCREASING THE MOMENTS OF INERTIA CRANE RAIL TORSIONAL

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

The influence of the moments of inertia increase of crane rails under twisting endurance of the crane beams is shown. The question of moment of inertia increase of the rail in torsion is researched.

*Keywords: crane rails, moment of inertia, flexural rigidity.*

Разработка и создание высокоресурсных подкрановых рельсов является актуальной проблемой для зданий тяжёлой промышленности. Надёжный способ повысить долговечность рельсов – это увеличить их моменты инерции. Авторами даны предложения по повышению моментов инерции крановых рельсов [1, 3], а также способы снижения напряжений [2, 4].

Крановые рельсы и конструкция верхней части подкрановой балки являются макрорегуляторами, амплитуды колебаний приводят к усталости стали в подрельсовой зоне подкрановых балок и вызывают появление и рост опасных усталостных трещин.

Управляя величинами основных характеристик кручения крановых рельсов  $J_{кр}$  и изгиба  $J_x$ , легко управлять ресурсом и выносливостью подрельсовой зоны подкрановых балок с тяжёлым режимом работы мостовых кранов 8К, 7К.

Колебания локальных напряжений циклами приводят к возникновению усталостных трещин в зоне стыка верхнего пояса со стенкой подкрановых балок, а их быстрый рост и развитие в длину верхнего пояса увеличивают вероятность обрушения подкрановой балки вместе с мостовым краном и грузом, например жидкой сталью. Усталостные трещины значительно снижают срок безопасной эксплуатации и ресурс подкрановых балок. Гарантировать безопасную эксплуатацию подкрановых балок

возможно совершенствованием конструкции крановых рельсов и узлов их соединения с верхними поясами балок.

Результат – значительное (в 3...3,9 раза) увеличение момента инерции рельса при кручении  $J_{кр}$  путем придания рельсу прокатом прямоугольного профиля сечения с отношением высоты сечения к его ширине  $n = h/t = 2,6...2,8$ , где  $h$  – высота сечения;  $t$  – толщина (ширина) сечения и снижение трудоёмкости проката вследствие упрощения профиля сечения.

Способ повышения момента инерции рельса при кручении заключается в том, что прямоугольную заготовку отливают способом непрерывного литья из легированной марганцовистой стали марки 35ГС, а затем непрерывно-литую, прямоугольную в сечении заготовку остужают до температуры пластического состояния (950...1050 °С). По рольгангу поступательно транспортируют заготовку в клеть прокатного стана, всесторонне обжимают литую заготовку валками прокатного стана с четырёх сторон.

Пластически деформируют сечение в прямоугольное с отношением высоты сечения к его ширине  $n = h/t = 2,6...2,8$ , где  $h$  – высота сечения;  $t$  – толщина (ширина) сечения, охлаждение водой ведут до температуры 535...580 °С.

Повышают момент инерции рельса при кручении  $J_{кр} = \eta b^4$  в 2,8...3,9 раза по сравнению со стандартным рельсом фигурного профиля, во время проката снабжают подошву рельса симметричной парой выступающих в бока продольных гребней сечением 15×15...20×20 мм для прикрепления к верхнему поясу подкрановой балки.

Монтируют готовый рельс в расширитель подошвы, совмещают отверстия, и высококоресурсными шпильками неподвижно соединяют подошву прямоугольного рельса с верхним поясом подкрановой балки.

С гарантией затягивают гайковёртом гайки шпилек и образуют единый рельсовый блок, обладающий увеличенными в 10...12 раз по сравнению со стандартным фигурным рельсом моментами инерции при изгибе, причем без увеличения материалоемкости.

Момент инерции кручения  $J_{кр}$  кранового рельса с фигурным профилем сечения ГОСТ4121-62\* сильно зависит от толщины шейки рельса. Увеличение толщины шейки  $t_{ш}$  рельса, при неизменной площади сечения  $A$ , приводит к быстрому увеличению момента инерции кручения  $J_{кр}$  вплоть до превращения фигурного профиля сечения в квадрат или прямоугольник.

Однако снижение момента инерции изгиба  $J_x$  допускать не следует, так как он влияет на амплитуды колебаний локальных напряжений и на выносливость узла соединения.

В статьях [1],[3] показано, что превращение фигурного профиля рельса в квадрат с такой же площадью сечения приводит к экстремальному возрастанию момента инерции кручения  $J_{кр}$  в 3,1 раза. Однако фигурный рельсовый профиль лучше вписывается в прямоугольник.

В современном сортаменте при расчёте на выносливость приходится использовать завышенные моменты инерции кручения  $J_{кр}$  крановых рельсов ГОСТ 4121-62\*, рассчитанные Митюговым Е.А.

Моменты инерции кручения  $J_{кр}$  рельсов и любых других сплошных профилей увеличиваются при концентрации материала в центре. Например, максимальным моментом инерции кручения обладает круглый в сечении сплошной стержень  $J_{кр} = J_p = \pi D^4 / 32$ , однако такой стержень для рельса плохо подходит. Прямоугольные сплошные профили также обладают большими моментами инерции кручения. Фигурный профиль рельса легко заменить эквивалентным двутавровым толстостенным рельсом, составленным из трёх прямоугольников, причём площадь сечения  $A$  и момент инерции рельса при изгибе  $J_x$  у них будут совпадать (табл. 1).

В табл. 2 приведены параметры толстостенных двутавровых в сечении рельсов, эквивалентных по площади  $A$  и моментам инерции  $J_x$  стандартным крановым рельсам по ГОСТ 4121-62\*. У стандартных крановых рельсов рекомендуем использовать в расчётах такие же моменты инерции при свободном кручении, так как эквивалентные профили подобраны при точном совпадении площадей  $A$  моментов инерции рельсов  $J_x$ .

$KP_{\max}$  эквивалентен прямоугольному рельсу. Определяем высоту сечения из уравнения третьей степени

$$h^3 - 60,8 h^2 + 309,1 h + 11655,1 = 0 \Rightarrow h = 22.$$

Т а б л и ц а 1

Вычисление  $\Sigma J_{Kp}$  толстостенных двутавровых рельсов, эквивалентных стандартным рельсам по ГОСТ 4121-62\* с фигурным профилем

Моменты	Площадь $A, \text{см}^2$	$t, \text{см}$	$J_x, \text{см}^4$	$b, \text{см}$ $h_{ш}, \text{см}$	$n$	$\eta$	$J_{Kp}, \text{см}^4$	$\Sigma J_{Kp}  $ $\text{см}^4$
KP140	195,53	5	7427,23	15,371	3,074	0,2963	186	1176,5
шейка		5		8,364	1,673	0,792	990,5	
KP120	150,44	4,4	4923,79	12,997	2,954	0,3218	485,4	485,4
шейка		4,4		8,2	1,863	0,4861	362,47	
KP100	113,32	3,8	2864,73	13,45	0,484	0,4835	336,92	269,15
шейка	14,906	3,8		7,306	1,923	0,3238	67,514	
KP80	81,13	3,2	1547,4	9,4194	2,944	0,4886	102,425	150,5
шейка		3,2		6,514	2,036	0,4584	48,07	
KP70	67,3	2,8	1081,09	8,966	3,202	0,7966	97,93	126,4
шейка		2,8		6,104	2,18	0,4632	28,47	

П р и м е ч а н и е :  $h_{ш} = (h - 2t)$ .

Т а б л и ц а 2

Толстостенные двутавровые рельсы, эквивалентные стандартным фигурным рельсам по ГОСТ 4121-62\*

Тип рельса	Площадь $A, \text{см}^2$	$J_x, \text{см}^4$	Толщина $t$ , см	$b, \text{см}$	$h, \text{см}$	$J_{Kp}, \text{см}^4$
$KP_{\max}$	246,14	13576,4	5,6	16,5	22	2033,7
KP 140	195,53	7427,23	5	15,371	18,364	1176,5
KP 120	150,44	4923,79	4,4	13,0	17,0	485,4
KP 100	113,32	2864,73	3,8	13,45	14,906	404,4
KP 80	81,13	1547,4	3,2	9,419	12,9144	150,5
KP 70	67,3	1081,09	2,8	8,9657	11,7044	126,4

Трансформируем стандартный крановый рельс (ГОСТ 4121-62\*) с фигурным профилем сечения KP 140 с площадью сечения  $A = 195,53 \text{ см}^2$ , в эквивалентный равновеликий по площади сечения  $A$  и с таким же моментом инерции при изгибе  $J_x = 7427,23 \text{ см}^4$  в прямоугольный рельс по нижеприведенному алгоритму.

1. Задаётся площадь сечения рельса KP 140 (ГОСТ 4121-62\*):  $A = 195,53 \text{ см}^2$  и моментом инерции  $J_x = 7427,23 \text{ см}^4$ .

2. Определяется момент инерции прямоугольного рельса относительно главной оси  $X$ .

3. Определяется высота сечения.

4. Определяется толщину  $t$  прямоугольного рельса.

5. Определяется момент инерции кручения  $J_{Kp} = \eta \cdot t^4$ , где коэффициент  $\eta$  находим в зависимости от отношения. (Увеличение  $3293,9/1176,5 = 2,8$  раза!)

6. Дополнительный массивный рельс  $KP_{\max}$   $A = 246,14 \text{ см}^2$ .

7. Задаётся  $n = h/t = 2, (6) \Rightarrow t = h/n \Rightarrow t = h/2, (6)$ .

8. Определяется высота сечения  $h = A/n = 246,14 \cdot 2, (6) = 25,62$ .

9. Определяется толщина  $t = h/n = 25,62 / 2, (6) = 9,6075$ .

10. Вычисляется момент инерции при изгибе.

11. Вычисляется момент инерции при кручении

$$\Rightarrow \eta \cdot t^4 = 0,47938 \cdot 9,6075^4 = 4084,34.$$

В табл. 3 приводятся параметры рельсов прямоугольного сечения.

Совпадение площадей  $A$  и моментов инерции рельсов  $J_x$  прямоугольного сечения со стандартными крановыми рельсами (ГОСТ 4121–62\*) с толстостенными двутавровыми рельсами гарантирует эквивалентность замены и близкое совпадение моментов инерции кручения  $J_{Kp}$ .

Т а б л и ц а 3

Прямоугольные рельсы, равноценные по площади сечения и моменту инерции  $J_x$  толстостенным двутавровым рельсам

Тип рельса	Площадь $A$ , см <sup>2</sup>	$J_x$ , см <sup>4</sup>	$t$ , см	$h$ , см	$n$	$J_{Kp}$ , см <sup>4</sup>	Увелич., раз
KP max	246,14	13463,31	9,607	25,62	2,(6)	4084,34	2,01
KP 140	195,53	7427,23	9,158	21,35	2,7466	3293,91	2,8
KP120	150,44	4923,79	7,59	19,82	2,61	1585,66	3,267
KP100	113,32	2864,73	6,506	17,417	2,667	859,61	3,92
KP80	81,13	1547,4	5,363	15,129	2,821	400,71	2,66
KP70	67,3	1081,09	4,847	13,884	2,864	268,3	2,12

Из сопоставления со стандартным рельсом следует:

- Трансформация стандартных крановых рельсов (ГОСТ 4121–62\*) в эквивалентные прямоугольные приводит к увеличению моментов инерции кручения  $J_{Kp}$  в 2,8...3,9 раз, при неизменной материалоемкости и моменте инерции рельсов при изгибе  $J_x$ .
- Упрощается прокат рельсов, так как фигурный профиль заменяется прямоугольным.
- Обеспечивается неподвижное (без сдвигов) соединение прямоугольного рельса с верхним поясом подкрановой балки.

Крановый рельс  $KP_{max}$  позволяет снизить амплитуды циклов колебания локальных напряжений, приводящих к возникновению усталостных трещин в зоне стыка верхнего пояса со стенкой подкрановых балок, до минимальных значений и не допускать возникновения усталостных трещин.

Крановый рельс  $KP_{max}$  увеличивает ресурс подрельсовой зоны подкрановых балок и позволяет гарантировать безопасную интенсивную эксплуатацию в течение 20 и более лет при тяжёлом 8К, 7К режиме работы мостовых кранов.

#### Список литературы

1. Нежданов, К.К. Экстремальное повышение моментов инерции рельсов при кручении / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов, И.Н. Гарькин. – М. Строительная механика и расчёт сооружений. – 2011. – № 6. – С.30.
2. Данилов, А.М. Защита от удара и сопровождающей вибрации: экспоненциально-тригонометрическая аппроксимация функций / А.М. Данилов, И.А. Гарькин, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительства. – 2012. – №3 (14). – С.85–89.
3. Нежданов, К.К. Применение толстостенных двутавровых крановых рельсов / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3 (14). – С. 79–84.
4. Данилов, А.М. Моделирование сопровождающей вибрации при ударе / А.М. Данилов, И.А. Гарькин, И.Н. Гарькин // Отраслевые аспекты технических наук. – 2012. – №9 (Сентябрь). – С.3–6.

#### References

1. Nezhdanov, K.K. Extreme increase the moment of inertia of rails torsional / K.K. Nezhdanov, A.K. Nezhdanov, I.N. Garkin. – M. Structural Mechanics and the calculation of constructions. – 2011. – № 6. – P.30.
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. The use of thick-walled I-beam crane rails / K.K. Nezhdanov, A.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Regional Architecture and construction. – 2012. – № 3 (14). – C. 79–84.
4. Danilov, A.M. Modeling accompanying vibration at impact / A.M. Danilov, I.A. Garkina, I.N. Garkin // Sectoral Dimensions Engineering. – 2012. – № 9 (September). – P.3–6.

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

**Зернов Владимир Викторович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Механика»

**Зайцев Михаил Борисович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Механика»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Zernov Vladimir Victorovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Mechanics»

**Zaytsev Mihail Borisovich**,  
Candidate of Engineering Sciences, Associate  
Professor of the department «Mechanics»

## ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В.В. Зернов, М.Б. Зайцев

Исследовано напряженно-деформированное состояние на границе контакта составных тел с различными механическими характеристиками. Рассмотрен вопрос снижения концентрации напряжений в сварном соединении, обусловленной разнородностью свойств сварного шва, околошовной зоны и формой шва.

*Ключевые слова: напряжения, деформации, концентрация напряжений, малонапряженность, механические характеристики, сварные соединения, околошовная зона, сварной шов, зерна, кристаллиты.*

## THE STRESS FIELD IN THE HEAT-AFFECTED ZONE OF WELDED JOINTS

V.V. Zernov, M.B. Zaytsev

The article deals with the research of the intense-deformed condition on the contact border of a compound body with various deformation properties. The problem concerning the reducing tensions concentration in the welded junction caused by the heterogeneity of properties of a welded joint and of a zone close to the joint as well as the form of a joint is analyzed.

*Keywords: tensions, deformations, tensions concentration, low tension, deformation properties, welded connections, zone close to the joint, welded joint, grains, crystalline particles.*

Главными задачами при проектировании и возведении металлических конструкций являются экономия металла и снижение трудоёмкости при изготовлении и монтаже элементов конструкций с обеспечением их прочности, жёсткости и устойчивости. Это достигается использованием сталей повышенной прочности, применением прогрессивных способов сварки, эффективных элементов конструкций и типов соединений. Применение сталей повышенной и высокой прочности приводит к уменьшению сечений элементов и их веса.

Многие строительные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются действию переменных нагрузок, поэтому в зоне сварных швов необходимо стремиться к снижению концентрации напряжений, которая является одной из главных причин появления и развития усталостных трещин.

Сварные соединения, включая и стыковые, со снятым усилением шва и без обработки шва при переменном нагружении разрушаются в месте перехода от наплавленного к основному металлу. Следовательно, кроме концентрации напряжений от геометрической формы шва на границе сплавления в сварном соединении имеются особенности, обусловленные металлургическими процессами при сварке. Действующие в настоящее время нормативные документы (ГОСТ 5264–80\*. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные; ГОСТ 8713–79. Сварка под флюсом. Соединения сварные; ГОСТ 14771–76\*. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные) регла-

ментуют лишь углы предварительной разделки кромок, зазор между стыкуемыми кромками, притупление кромок, длину скоса листа при наличии разности толщин металла, смещение кромок относительно друг друга. Конечная форма шва после сплавления с основным металлом не регламентируется.

Проанализируем напряжённое состояние на границе сплавления основного металла и сварного шва.

Представим сварное соединение как составное тело и используем решения теории упругости для составного тела. Рассмотрим напряжённо-деформированное состояние тела, составленного из двух различных призматических тел, спаянных между собой по боковой поверхности. Соответствующая плоская область изображена на рис. 1.

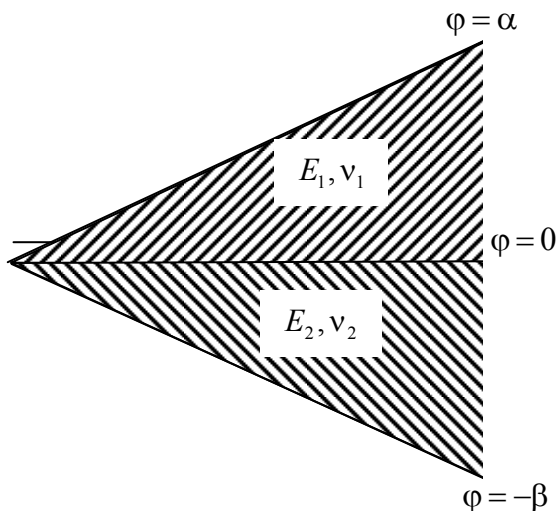


Рис. 1. Плоская область составного тела

В декартовой системе координат напряжения через функцию Эри  $\Phi$  выражаются следующими формулами [1]:

$$\sigma_x^i = \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial y^2}; \quad \sigma_y^i = \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial x \partial y}; \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – функция  $\Phi$  в областях, соответствующих составляющим материалам (см. рис. 1). В каждой из этих областей функция  $\Phi$  удовлетворяет бигармоническому уравнению:

$$\nabla^2 \Phi_i = \frac{\partial^4 \Phi_i}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \Phi_i}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi_i}{\partial y^4} = 0, \quad (i = 1, 2). \quad (2)$$

Принимая ветви внешнего контура рассматриваемой области и линию контакта в окрестности угловой точки прямолинейными, условия непрерывности перемещений на линии раздела двух тел представляются в следующем виде:

$$m_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} - (1 - m_1) \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} \Big|_{\varphi=0} = \mu \left[ m_2 \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y^2} - (1 - m_2) \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x^2} \right]_{\varphi=0}, \quad (3)$$

$$m_1 \frac{\partial^3 \Phi_1}{\partial y^3} + (1 + m_1) \frac{\partial^3 \Phi_1}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{\varphi=0} = \mu \left[ m_2 \frac{\partial^3 \Phi_2}{\partial y^3} + (1 + m_2) \frac{\partial^3 \Phi_2}{\partial x^2 \partial y} \right]_{\varphi=0},$$

где

при плоской деформации

$$m_i = 1 - \nu_i,$$

при плоском напряжённом состоянии

$$m_i = \frac{1}{1 + \nu_i}.$$

Коэффициент  $\mu$  в обоих случаях один и тот же:

$$\mu = \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{1 + \nu_2}{1 + \nu_1} = \frac{G_1}{G_2},$$

где  $E_i$ ,  $G_i$ ,  $\nu_i$  – модули упругости, сдвига и коэффициенты поперечных деформаций соединяемых материалов.

Условия непрерывности перемещений на линии контакта (3) записаны в декартовой системе координат  $(x, y)$ , когда ось  $x$  направлена по линии контакта.

В полярных координатах выражения (1)–(3) и условия на линии раздела с учётом прямолинейности ветвей имеют вид:

$$\sigma_r^i = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial y^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi_i}{\partial r}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial r^2}; \quad \tau_{r\varphi} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi_i}{\partial \varphi} \right), \quad (i=1, 2). \quad (4)$$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) \Phi_i = 0, \quad (i=1, 2).$$

$$\Phi_1(r, \alpha) = \frac{\partial \Phi_1}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\alpha} = \Phi_2(r, -\beta) = \frac{\partial \Phi_2}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=-\beta} = 0; \quad (5)$$

$$\Phi_1(r, 0) = \Phi_2(r, 0); \quad \frac{\partial \Phi_1}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0}.$$

$$\frac{m_1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \varphi^2} - (1 - m_1) \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial r^2} + \frac{m_1}{r} \frac{\partial \Phi_1}{\partial r} = \mu \left[ \frac{m_2}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial \varphi^2} - (1 - m_2) \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial r^2} + \frac{m_2}{r} \frac{\partial \Phi_2}{\partial r} \right];$$

$$\begin{aligned} & \frac{m_1}{r^3} \frac{\partial^3 \Phi_1}{\partial \varphi^3} + (1 + m_1) \frac{\partial^3 \Phi_1}{r \partial \varphi \partial r^2} - \frac{(2 - m_1)}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial r \partial \varphi} + \frac{2}{r^3} \cdot \frac{\partial \Phi_1}{\partial \varphi} = \\ & = \mu \left[ \frac{m_2}{r^3} \cdot \frac{\partial^3 \Phi_2}{\partial \varphi^3} + \frac{(1 + m_2)}{r} \cdot \frac{\partial^3 \Phi_2}{\partial \varphi \partial r^2} - \frac{(2 - m_2)}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial r \partial \varphi} + \frac{2}{r^3} \cdot \frac{\partial \Phi_2}{\partial \varphi} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Решение уравнения (5) представляется в виде

$$\Phi_i = r^{\lambda+1} \theta_i(\lambda, \varphi), \quad i=1, 2, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – произвольный параметр.

После подстановки (7) в (5) и (6) получаем обыкновенное дифференциальное уравнение четвёртого порядка для  $\theta_i(\lambda, \varphi)$ :

$$\theta_i^{IV} + 2(\lambda^2 + 1) \theta_i^{II} + (\lambda^2 - 1) \theta_i = 0. \quad (8)$$

Общее решение (8) имеет вид

$$\theta_i(\lambda, \varphi) = A_{i1} \sin(\lambda+1)\varphi + A_{i2} \cos(\lambda+1)\varphi + A_{i3} \sin(\lambda-1)\varphi + A_{i4} \cos(\lambda-1)\varphi, \quad (i=1,2). \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), получаем:

$$\Phi_i = r^{\lambda+1} [A_{i1} \sin(\lambda+1)\varphi + A_{i2} \cos(\lambda+1)\varphi + A_{i3} \sin(\lambda-1)\varphi + A_{i4} \cos(\lambda-1)\varphi], \quad (i=1,2). \quad (10)$$

Удовлетворяя условиям (6), при помощи (10) получаем систему однородных линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов:

$$A_{ij} \quad (i = 1,2; j = 1,2,3,4):$$

$$\begin{aligned} \sin(\lambda+1) \alpha A_{11} + \cos(\lambda+1) \alpha A_{12} + \sin(\lambda-1) \alpha A_{13} + \cos(\lambda-1) \alpha A_{14} &= 0; \\ (\lambda+1) \cos(\lambda+1) \alpha A_{11} - (\lambda+1) \sin(\lambda+1) \alpha A_{12} + (\lambda-1) \cos(\lambda-1) \alpha A_{13} - (\lambda-1) \alpha A_{14} &= 0; \\ -\sin(\lambda+1) \beta A_{21} + \cos(\lambda+1) \beta A_{22} - \sin(\lambda-1) \beta A_{23} + \cos(\lambda-1) \beta A_{24} &= 0; \\ (\lambda+1) \cos(\lambda+1) \beta A_{21} + (\lambda+1) \sin(\lambda+1) \beta A_{22} + (\lambda-1) \cos(\lambda-1) \beta A_{23} + (\lambda-1) \sin(\lambda-1) \beta A_{24} &= 0; \\ (A_{12} + A_{14} - A_{22} - A_{24}) &= 0; \\ (\lambda+1) A_{11} + (\lambda-1) A_{13} - (\lambda+1) A_{21} - (\lambda-1) A_{23} &= 0; \\ (\lambda+1) A_{12} + (\lambda+1-4m_1) A_{14} - \mu (\lambda+1) A_{22} - \mu (\lambda+1-4m_2) A_{24} &= 0; \\ (\lambda+1) A_{11} + (\lambda-1+4m_1) A_{13} - \mu (\lambda+1) A_{21} - \mu (\lambda-1+4m_2) A_{23} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Условие существования нетривиального решения (11) приводит к уравнению

$$\Delta(\lambda; \mu; m_1; m_2; \alpha; \beta) = 0. \quad (12)$$

Раскрывая определитель (12), после существенного упрощения громоздких выражений, получаем уравнение

$$\begin{aligned} f(\lambda) &= (\mu-1)^2 (\sin^2 \lambda \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) \cdot (\sin^2 \lambda \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta) + 4\mu m_1 m_2 \cdot \\ &\cdot [\sin^2(\alpha + \beta) \lambda - \lambda^2 \sin^2(\lambda + \beta)] - 4(\mu-1) \cdot \\ &\cdot [\mu m_2 (\sin^2 \lambda \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) \cdot \sin^2 \lambda \beta - m_1 (\sin^2 \lambda \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta) \sin^2 \lambda \alpha] + \\ &+ 4(\mu m_2 - m_1) \cdot [\mu m_2 (\sin^2 \lambda \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) - m_1 (\sin^2 \lambda \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta)] = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Разделяя уравнение (13) на  $(\lambda-1)$ , из множества его корней исключается простой корень  $\lambda = 1$ :

$$f^* = \frac{1}{\lambda-1} f(\lambda; \alpha; \beta; \mu; m_1; m_2) = 0. \quad (14)$$

Параметры, входящие в уравнение (14), меняются в следующих интервалах:

$$\alpha \geq 0; \beta \geq 0; \alpha + \beta \leq 2\pi; 0 < \mu < \infty; 0,5 \leq m_i \leq 1. \quad (15)$$

Отсутствие концентрации напряжений на крае поверхности контакта обеспечивается значением углов  $\alpha$  и  $\beta$ , для которых уравнение (13) не имеет корня  $\lambda = \xi + i\eta$  с действительной частью  $\xi$ , принадлежащей интервалу  $(0,1)$ .

Переходя к пределу в (14), при  $\lambda \rightarrow 1$  в пятимерном пространстве параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ , получаем уравнение предельной поверхности, являющейся границей области «нулевого напряжённого состояния края поверхности контакта»:

$$\begin{aligned} \mu m_1 m_2 [(\alpha + \beta) \cos(\alpha + \beta) - \sin(\alpha + \beta)] \sin(\alpha + \beta) + \\ + \mu m_2 [\mu m_2 - m_1 - (\mu-1) \sin^2 \beta] \cdot (\alpha \cos \alpha - \sin \alpha) \sin \alpha - \\ - m_1 [\mu m_2 - m_1 - (\mu-1) \sin^2 \alpha] \cdot (\beta \cos \beta - \sin \beta) \sin \beta = 0. \end{aligned} \quad (16)$$



Таким образом, при различных механических характеристиках материалов соединяемых тел существует достаточно широкая область, в которой, при определённых наклонах поверхности контакта, окрестность края будет «малонапряжённой». Под термином «малонапряжённость» понимается не только отсутствие концентрации напряжений, но и равенство нулю некоторых компонентов напряжений или их малость по сравнению с номинальными напряжениями.

Уравнение (16) позволяет определить границы области, за пределами которой имеет место сильная концентрация напряжений.

Явление «малонапряжённости» и его закономерности относятся к составным телам, в которых упругие характеристики материалов являются кусочно-постоянными функциями пространственных координат.

Сварные соединения можно отнести к составным телам, в которых к поверхности контакта (границе сплавления) с двух её сторон примыкают околошовная зона и металл шва с различными механическими свойствами. Основанием для такого вывода является следующее:

1. Сварка плавлением достигается путём локального расплавления металла свариваемых деталей и присадочного металла, а также смачивания твёрдого металла жидким. Расплавленный металл образует сварочную ванну. По мере удаления источника нагрева происходит затвердевание – кристаллизация металла сварочной ванны и формирование шва, соединяющего детали в одно целое. Переход металла сварочной ванны из жидкого состояния в твёрдое называют первичной кристаллизацией. Процесс первичной кристаллизации заканчивается образованием столбчатых кристаллитов.

Металл шва при всех видах сварки плавлением имеет литую структуру с чётко выраженной направленностью кристаллитов. Такая структура особенно характерна для однослойных швов.

Первичная кристаллизация сварочной ванны при всех видах дуговой сварки начинается от частично оплавленных зёрен основного металла, являющихся готовыми центрами кристаллизации. Видимая граница между основным металлом и металлом шва исчезает. Поверхность раздела между зёрнами основного металла и кристаллитами шва называют границей шва или границей сплавления.

2. Столбчатые кристаллиты отличаются сравнительно крупными размерами и легко различимы при изучении макроструктуры. Так, при дуговой сварке их размер обычно равен 0,3–3 мм в поперечнике [2]. Рост кристаллитов происходит нормально к криволинейной поверхности раздела основного металла и металла сварочной ванны.

Разница в размерах и ориентации зёрен шва и околошовной зоны сварного соединения обуславливает различие их механических характеристик.

Соотношение между пределом текучести железа  $\sigma_T$  и малоуглеродистой стали и средним размером зерна  $d$  установлено в работе [3] и имеет вид:

$$\sigma_T = \sigma_0 + Kd_i^{-0,5} \quad (i = 1, 2). \quad (17)$$

Параметры  $\sigma_0$  и  $K$  для данного материала при данной температуре и данной скорости деформирования являются постоянными величинами.

3. Модуль упругости для кристаллов феррита меняется от 135 ГПа в направлении, перпендикулярном граням куба, до 290 ГПа в направлении диагонали куба.

Таким образом, сварной шов представляет собой прослойку с меньшей прочностью и модулем упругости по сравнению с околошовной зоной и основным металлом сварного соединения. Проведенный авторами металлографический анализ образцов металла из околошовной зоны и шва сварных соединений в заводских лабораториях г. Пензы показал, что диаметр зерна в шве в среднем в 2 раза больше, чем в околошовной зоне.

Усталостные трещины зарождаются из линий скольжения в объёме материала, соизмеримом с размером зерна металла. Как известно, материал, взятый в очень малом объёме, имеет неоднородную структуру. Поэтому для микрообъёма материала уравнения теории упругости, справедливые для однородного материала, собственно

теряют свою силу. И если они оказываются применимыми для макрообъёма материала, то лишь вследствие того, что для достаточно большого объёма можно говорить уже о некоторой средней однородности его структуры (определяемые из опыта модули упругости являются такими осреднёнными характеристиками). С помощью теории упругости можно надёжно определить лишь общие деформации тела или усреднённые значения напряжений на макроплощадке в каком-либо сечении тела, но невозможно оценить действительные величины напряжений, имеющие место на микроплощадке. Действительное распределение напряжений по какой-либо микроплощадке оказывается в силу неоднородности материала крайне неравномерным, так как в связи с различной ориентацией зёрен по отношению к направлению усилия их модуль упругости в соответствующем направлении будет различным. Отдельные пики напряжений могут в несколько раз превышать усреднённое напряжение по площадке, определяемое обычными методами или методами теории упругости [1]. Ввиду этого даже при малых внешних нагрузках, в отдельных зёрнах или на границах зёрен материала могут возникать под действием пиков напряжений пластические деформации, которые являются причиной упругого гистерезиса в материале в обычной «упругой» области. Общая деформация материала образца является при этом в основном упругой; ей сопутствует небольшая обратимая пластическая деформация, которая может быть названа микропластической в отличие от макропластической необратимой деформации, которая имеет место при очень больших средних напряжениях, когда весь материал деформируется в основном пластически.

Следовательно, в предельном состоянии можно считать:

$$\nu_1 = \nu_2 = 0,5;$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon; E_1 = \frac{\sigma_{T_1}}{\varepsilon}; E_2 = \frac{\sigma_{T_2}}{\varepsilon}, \quad (18)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – модули деформаций шва и околошовной зоны соответственно,  $E_2 > E_1$ ;  $\nu_1$  и  $\nu_2$  – коэффициенты поперечной деформации шва и околошовной зоны соответственно.

В частном случае  $\alpha + \beta = \pi$  (гладкая поверхность составного тела) после преобразования уравнение предельной поверхности (16) примет вид:

$$\begin{aligned} & \left[ \mu m_2 - m_1 - (\mu - 1) \sin^2 \alpha \right] \cdot \\ & \cdot \left[ (\mu m_2 - m_1) \cdot (\alpha \cos \alpha - \sin \alpha) + m_1 \pi \cos \alpha \right] \sin 2\alpha = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

В формуле (19) угол  $\alpha$  принадлежит материалу, имеющему меньшие механические характеристики,  $\beta = \pi - \alpha$  – материалу с большими механическими характеристиками в составном теле (рис. 2).

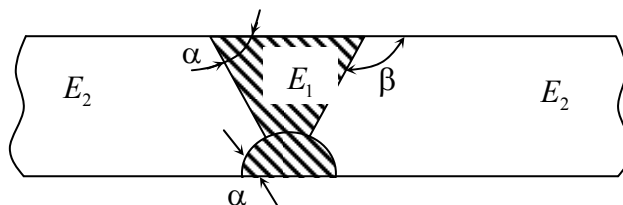


Рис. 2. Схема сварного соединения:  $E_2 > E_1$

Наименьшее положительное значение корня уравнения (19) находится приравнением к нулю каждого из сомножителей:

$$1. \mu m_2 - m_1 - (\mu - 1) \sin^2 \alpha = 0, \sin^2 \alpha = \frac{m_1 - \mu m_2}{1 - \mu},$$

откуда  $\alpha \leq \arcsin \sqrt{\frac{m_1 - \mu m_2}{1 - \mu}}$ , если  $\mu < \frac{1 - \nu_1}{1 - \nu_2}$  и  $\mu < \frac{\nu_1}{\nu_2}$ ; (20)

$$2. (\mu m_2 - m_1)(\alpha \cos \alpha - \sin \alpha) + \pi m_1 \cos \alpha = 0,$$

откуда  $\operatorname{tg} \alpha - \alpha = \frac{\pi(1 - \nu_1)}{\mu m_2 - m_1}$ , если  $\mu > \frac{1 - \nu_1}{1 - \nu_2}$ ;

$$3. \sin 2\alpha = 0, \text{ если } \frac{\nu_1}{\nu_2} < \mu < \frac{1 - \nu_1}{1 - \nu_2}.$$

*Примечание.* В третьем случае значение предельного угла не зависит от механических характеристик и равно  $\pi/2$ .

Анализ корней (20) показывает, что малейшее отклонение механических характеристик материалов при любой заранее выбранной геометрии поверхности контакта может привести к появлению сильной концентрации напряжений.

В рассматриваемой задаче, учитывая (18), получим:

$$\mu = \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{1 + \nu_2}{1 + \nu_1} = \frac{G_1}{G_2} < 1,$$

$$m_1 = m_2 = m.$$

Тогда наименьшим положительным корнем (20) будет:

$$\alpha \leq \arcsin \sqrt{\frac{m_1 - \mu m_2}{1 - \mu}}.$$

Для плоской деформации имеем:

$$\alpha \leq \arcsin \sqrt{m}, \quad (21)$$

где  $m = (1 - \nu)$ ,  $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ .

Следовательно, предельный угол, при котором соблюдается «малонапряжённое» состояние на границе сплавления в сварных соединениях, определяется только коэффициентом Пуассона. В предельном случае, при  $\nu = 0,5$ :

$$\alpha \leq \arcsin \sqrt{1 - 0,5} = 45^\circ. \quad (22)$$

В сварных соединениях угол между швом и основным металлом в готовом изделии не контролируется, особенно при сварке тонколистовых элементов.

С этих позиций можно объяснить результаты усталостных испытаний образцов с одинаковой предварительной разделкой кромок.

В процессе сварки расплавленный металл сварочной ванны оплавляет края соединяемых элементов и нарушает предварительную разделку кромок как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения угла между касательной к шву и основным металлом в точке на линии сплавления (рис. 3). Это приводит к тому, что в одних образцах случайно выполнялось условие «малонапряженности», а в других нет.

Поэтому для одинаковых образцов с одинаковой предварительной разделкой кромок наблюдался разброс результатов усталостных испытаний.

Обеспечивая заданную геометрию сварного шва, например, оплавлением границы перехода неплавящимся электродом, можно уменьшить влияние неравномерности

свойств в зоне термического влияния на выносливость сварных соединений, в которых сварной шов представляет собой прослойку с меньшей прочностью и модулем упругости по сравнению с околосшовной зоной и основным металлом сварного соединения.

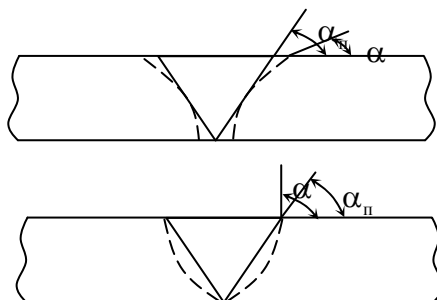


Рис. 3. Оплавление кромок в процессе сварки:  
 $\alpha_n$  – угол предварительной разделки;  $\alpha$  – угол после сварки

Таким образом, для обеспечения минимальной концентрации напряжений на границе сплавления сварного соединения необходимо, чтобы угол наклона между касательной к шву в угловой точке на границе сплавления и поверхностью соединения составлял не более  $45^\circ$  [4]. В противном случае высокая концентрация напряжений на границе сплавления неизбежна.

#### Список литературы

1. Теория упругости и пластичности / А.Г. Горшков, Д.В. Тарлаковский, Э.И. Старовойтов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 416 с.
2. Металлические конструкции / под ред. Ю.И. Кудишина. – 12-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 688 с.
3. Ch.P.Poole, F.J. Owens, Introduction in nanotechnology, John Wiley & Sons, 2003.
4. Зернов, В.В. Конструкции сварных стыков плоских и гофрированных пластин, подверженные действию циклических нагрузок / В.В. Зернов. – Л.: Ленингр. инж.-строит. ин-т., 1981. – 8 с.

#### References

1. Theory of elasticity and plasticity / A.G. Gorshkov, D.V. Tarlakovskii, E.I. Starovoytov. – M.: FIZMATLIT, 2011 – 416 p.
2. Metal construction / Ed. Y.I. Kudishin. – 12th ed., Sr. – M.: Editio-mer center «Academy», 2010. – 688 p.
3. Ch.P.Poole, F.J. Owens, Introduction in nanotechnology, John Wiley & Sons, 2003.
4. Zernov, V.V. Design of welded joints of flat and corrugated plates exposed to cyclic loads / V.V. Zernov. – L.: Leningrad. engineer-building. Inst., 1981. – 8 p.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 621.311.22:614.7

*Сумский государственный университет*  
Украина, 40007, г. Сумы,  
ул. Римского-Корсакова, д.2,  
тел.: (0542) 33-12-05

**Пляцук Леонид Дмитриевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Прикладная экология»,  
академик Инженерной академии Украины,  
академик Международной академии наук  
экологии и безопасности  
жизнедеятельности  
E-mail: plyacul<@teko.sumy.ua

**Гурец Лариса Леонидовна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Прикладная экология»  
E-mail: larisa\_gurets@bk.ru

*Sumy State University*  
Ukraine, 40007, Sumy, 2,  
Rimsky-Korsakov St.,  
tel.: (0542) 33-12-05

**Plyatsuk Leonid Dmitrievich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Applied Ecology», Academician  
of Engineering Academy of Ukraine,  
academician of the International Academy  
of Ecology and Life Protection Sciences  
E-mail: plyacul<@teko.sumy.ua

**Gurets Larisa Leonidovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Applied Ecology»  
E-mail: larisa\_gurets@bk.ru

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОРА ПЫЛЕГАЗООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Л.Д. Пляцук, Л.Л.Гурец

Изложены принципы методологии исследования, расчета и выбора пылегазоочистных аппаратов, включающей два основных этапа – процесс разработки и процесс реализации. С использованием основных предложенных положений проведен выбор конструкций высокоэффективного пылегазоочистного оборудования.

*Ключевые слова: техногенное влияние, методология, пылеочистка, газоочистка, оборудование.*

## RESEARCH METHODOLOGY AND CHOICE OF DUST AND GAS CLEANING EQUIPMENT

L.D. Plyatsuk, L.L.Gurets

Principles of methodology of research, calculation and choice of clearing devices, including two basic stages-process of working out and realisation process are stated. Choice of highly effective clearing equipment structures with the use of basic offered positions is given.

*Keywords: technological impact, methodology, dedusting, gas cleaning, equipment.*

Экономике Украины присущ высокий удельный вес ресурсоемких и энергоемких технологий, внедрение и наращивание которых осуществлялось дешевым способом без строительства соответствующих очистных сооружений. Это привело к тому, что объемы выбросов вредных веществ в атмосферу растут. В течение 2011 года выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух осуществляли около 8,7 тыс. промышленных предприятий; от них в атмосферу поступило более 4,37 млн т загрязняющих веществ, что на 5,9 % больше, чем в 2010 году [1].

Из-за несовершенства технологических процессов и газоочистного оборудования действующих предприятий в атмосферу поступают газы, содержащие различные по токсичности газообразные компоненты, пары органических жидкостей, мелкодисперсные капли и твердые частицы. Все приведенные факты остро ставят задачу разработки и правильного выбора высокоэффективного газоочистного оборудования, способного осуществлять комплексную очистку газов.

Анализ аппаратурного оформления технологических схем очистки газов показал, что при их компоновке отсутствовали научно обоснованные критерии выбора. Так, для улавливания одних и тех же компонентов используются различные конструкции массообменных и пылеулавливающих устройств. Несмотря на многообразие конструктивных усовершенствований газоочистного оборудования, аппараты не всегда обеспечивают требуемую эффективность очистки. Это связано с тем, что при разработке и модернизации пылегазоочистного оборудования преобладали технические решения, а не научно-системный подход. Известные исследования не позволяют создать целостную методологию разработки новых конструкций оборудования, оканчивающуюся внедрением их в промышленность, а позволяют лишь прогнозировать решения на стадии проектирования.

Предлагаемая методология разработки и создания пылегазоочистных аппаратов включает два основных этапа – процесс разработки и процесс реализации. Основу процесса разработки составляют формирование задач и выработка решений.

При формировании задач анализируются состояние отраслей потребителей и изготовителей, а также современный уровень науки и техники. Результатом анализа является определение задач, стоящих перед разработчиками новых конструкций аппаратов.

Выработка решений осуществляется в две стадии. На первой стадии на основании конструктивно-технологической классификации известных групп массообменных и пылеулавливающих аппаратов производится выбор аналогов оборудования по функциональным признакам и после выявления их положительных и отрицательных признаков принимаются прогнозные решения. На второй стадии прогнозные решения корректируются с учетом нормативных требований, а также учитываются возможности предприятий-изготовителей и потребителей. В итоге осуществляется выработка адекватного решения.

Процесс реализации, в свою очередь, подразделяется на два блока – создание и внедрение. В процессе создания новой конструкции аппарата, с целью оптимизации ее режимных и конструктивных параметров, проводятся исследования узлов, модулей, а также аппарата в целом. На основании результатов выполненных исследований осуществляется технико-экономическая оценка, предусматривающая определение технологических и экономических показателей образцов, которые сравниваются с выбранными, являющимися, как правило, лучшими по техническому уровню аналогами. Наличие улучшенных показателей является основой для выработки проектных решений и проведения испытаний опытного образца. Создание новой конструкции аппарата заканчивается разработкой бизнес-плана.

Блок внедрения газоочистного оборудования предусматривает заключение контракта о лицензионной продаже решения. После этого для конкретной отрасли промышленности (или отдельного предприятия) проводятся межведомственные испытания, разрабатываются нормативы и технические условия, проводятся согласование и координация принятых решений, и осуществляется серийное или массовое изготовление нового образца.

Рассмотрим стадии процесса разработки применительно к условиям Украины.

#### 1. Формирование задач.

Основными загрязнителями атмосферного воздуха в Украине являются предприятия черной металлургии, тепловой энергетики, угольной, нефтегазовой, добывающей, цементной, химической и нефтехимической промышленности, выбросы загрязняющих веществ которых составляют почти 90 % от общего объема выбросов стационарных

источников. Эти предприятия и являются крупными потребителями пылегазоочистного оборудования.

Анализ состояния отраслей-потребителей показывает, что большинство технологических схем очистки газовых выбросов укомплектовано полыми форсуночными, механическими, насадочными и тарельчатыми аппаратами, электрическими и рукавными фильтрами.

Полые форсуночные скрубберы просты в изготовлении, однако эффективность очистки в них не превышает 60 %. Аппараты, использующие механическую энергию, имеют сложную конструкцию за счет наличия движущегося рабочего органа. Эффективность очистки в них также невелика, тогда как затраты энергии на привод рабочего органа значительны. Насадочные и тарельчатые аппараты часто простаивают из-за забивания насадки и отверстий тарелок твердыми примесями, обладают большим гидравлическим сопротивлением и незначительной эффективностью. Рукавные фильтры и электрофильтры отличаются сравнительно высокой эффективностью, однако занимают большие производственные площади, потребляют значительное количество электроэнергии, а также сложны в изготовлении, монтаже и эксплуатации.

На промышленных предприятиях часто применяется многоступенчатая схема очистки газов: улавливание пыли и массообменный процесс. Причем для осуществления одного и того же процесса применяются многочисленные конструкции пылегазоочистного оборудования. Так, для абсорбции фтористых соединений используются механические, пенные, насадочные, центробежные и полые скрубберы, имеющие низкую эффективность и часто забивающиеся твердыми примесями, что приводит к частой остановке всей технологической линии.

Отсюда вытекают следующие требования отраслей-потребителей к созданию пылегазоочистного оборудования: высокая эффективность; низкая энергоемкость; надежность в эксплуатации; многофункциональность; простота изготовления и ремонта с использованием собственной ремонтно-механической базы; низкая стоимость.

При формировании задач оценивается также состояние отраслей-изготовителей. В Украине существует ряд предприятий по выпуску пылегазоочистного оборудования, например: Бердичевский машиностроительный завод «Прогресс», выпускающий электрофильтры и рукавные фильтры; Запорожский завод газоочистного оборудования, поставляющий электрофильтры, циклоны, скрубберы, трубы Вентури, каплеуловители. Требования отраслей-изготовителей к созданию пылегазоочистного оборудования: технологичность конструкции; потребность в массовом производстве; использование отечественных материалов, деталей и узлов; высокий технический уровень оборудования, позволяющий обеспечить потребности внутреннего рынка и выпускать пылегазоочистные аппараты на экспорт; патентная защищенность.

Исходя из вышеперечисленных требований отраслей-потребителей и отраслей-изготовителей формулируется следующий блок задач по созданию газоочистного оборудования:

- высокий технический уровень разработок, включающий высокую эффективность, низкую энерго- и материалоемкость, надежность в эксплуатации, технологичность и низкую стоимость изготовления, патентную защищенность;
- многофункциональность, т.е. возможность использования оборудования для совместного улавливания пыли и газа различных физико-химических свойств с получением растворов и шламов заданной концентрации;
- выпуск конкурентоспособного оборудования.

## 2. Выработка решений.

Создание методологии разработки высокоэффективных массообменных и пылеулавливающих аппаратов базируется на анализе современных конструкций аппаратов с точки зрения затрат энергии на проведение процессов, эффективности их работы, материалоемкости, технологичности. Выделяются общие положительные признаки, присущие группам аппаратов, и разрабатываются новые конструкции, где эти признаки наиболее сконцентрированы.

Аппараты для проведения процессов газоочистки и пылеулавливания в системе газ – жидкость по способу воздействия на контактирующие потоки можно условно разделить на две большие группы:

- 1) аппараты, использующие механическую энергию;
- 2) аппараты, использующие энергию подводимых потоков.

Обобщение данных по аппаратам, использующим механическую энергию, показывает, что движущиеся рабочие органы способствуют интенсификации процессов массообмена и пылеулавливания за счет создания развитой межфазной поверхности, причем наличие твердых примесей в газовой и жидкой фазах не снижает эффективности проводимых процессов. Гидравлическое сопротивление в этих аппаратах невелико. Однако аппараты этой группы сложны в изготовлении, монтаже и обслуживании, имеют низкий коэффициент полезного действия. Несомненным положительным признаком данных аппаратов является механическое воздействие вращающимся или движущимся рабочим органом на структуру потоков. Этот признак может быть положен в основу методологии разработки новых аппаратов.

Наибольшее количество положительных признаков имеют аппараты, использующие энергию подводимых потоков. Среди перспективных конструкций пылегазоочистного оборудования данного класса можно отметить аппараты: ударно-инерционного [3], скоростного [4] действия, аппараты с крупнодырчатыми провальными тарелками [5] и аппараты с подвижной насадкой [6].

В аппаратах ударно-инерционного действия положительным признаком является ударное воздействие газового потока о поверхность покоящейся жидкости, отсутствие устройств для перемещения жидкости и простота конструкции. Это позволяет эффективно использовать их в процессах пылеулавливания.

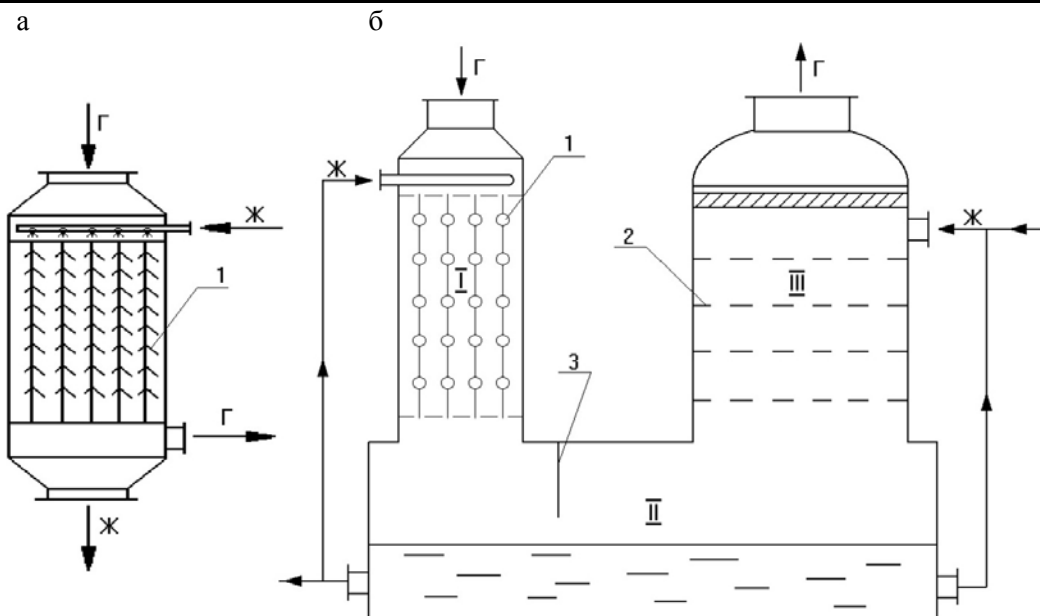
Положительным признаком аппаратов скоростного действия является создание высоких относительных скоростей между твердыми, жидкими частицами и газовым потоком, что приводит к снижению диаметра капель и получению развитой межфазной поверхности. Областью применения этих аппаратов являются процессы пыле- и газоочистки.

В аппаратах с подвижной насадкой положительным признаком является создание вихревой структуры слоя за счет введения в поток твердых насадочных тел. Усовершенствованные конструкции аппаратов этого типа – аппараты с регулярной подвижной насадкой – при определенном пространственном расположении насадочных элементов реализуют режим одновременного вихреобразования. В результате этого растет поверхность контакта фаз и происходит значительная интенсификация проводимых процессов. Аппараты с регулярной подвижной насадкой имеют низкое гидравлическое сопротивление. Областью применения этих аппаратов являются процессы абсорбции.

В аппаратах с крупнодырчатыми провальными тарелками достигаются высокие скорости газа, что позволяет проводить процесс в режиме развитой турбулентности. Повышение скорости газа приводит к увеличению единичной мощности аппаратов, снижает металлоемкость, способствует повышению эффективности пыле- и газоочистки. В аппаратах данного типа можно проводить комплексную очистку отходящих газов от пыли и загрязняющих веществ.

После анализа положительных и отрицательных признаков выбранных аналогов проводится прогнозирование создания конструкций массообменных и пылеулавливающих аппаратов, использующих закономерности взаимодействия турбулентных, вихревых, пульсирующих, соударяющихся потоков. Прогнозные решения должны учитывать требования предприятий-потребителей и предприятий-изготовителей. При этом разработчики конструкций и проектировщики должны стремиться к созданию новых аппаратов, обладающих простотой и технологичностью, унифицированностью и взаимозаменяемостью узлов и деталей. Необходимо также учитывать возможность модернизации существующего оборудования. Исходя из этих требований и на основе положительных признаков выявленных аналогов были разработаны конструкции пылегазоочистного оборудования (см. рисунок).





Схемы пылегазоочистных аппаратов:

а – абсорбер; б – аппарат для комплексной очистки газов

Прямоточный аппарат с регулярной пульсационной насадкой (см. рисунок «а»), работающий в режиме нисходящего прямотока, позволяет проводить процесс при скоростях газа 10–20 м/с [7]. Насадка состоит из дискретно расположенных насадочных тел, закрепленных на твердых стержнях с возможностью выполнения колебательных движений во фронтальной плоскости. Элемент насадки представляет собой неравнобокий уголок. Обтекание элемента насадки газожидкостным потоком происходит с периодическим срывом вихрей. Причиной этого является мгновенная смена скорости и давления в результате резкого изменения направления потока на краях насадки. Сочетание нисходящего прямотока с работой насадки в пульсационном режиме позволяет работать с потоками, содержащими твердые частицы, налипающие и смолистые вещества, а также решить задачу снижения энергетических затрат на проведение процесса. Аппарат предназначен для осуществления процессов абсорбции.

Аппарат, представленный на рисунке, применяется для комплексной очистки отходящих газов от пыли и загрязняющих веществ [8]. Объединение положительных качеств скоростных, ударно-инерционных аппаратов, аппаратов с подвижной насадкой и крупнодырчатыми тарелками позволяет достичь высокой эффективности пыле- и газоочистки, а также проводить очистку отходящих газов при отсутствии забивания оборудования. Аппарат состоит из трех блоков: I – блока высокоинтенсивной очистки (БВО); II – блока сепарации (БС); III – блока тонкой очистки (БТО). В БВО происходит нисходящее прямоточное движение газа и жидкости через слой регулярной подвижной насадки 1. Скорость газа в БВО составляет 10–20 м/с. Обтекание элементов насадки высокоскоростным газожидкостным потоком сопровождается вихреобразованием и пульсационным движением насадочных тел. За счет этого происходит постоянный процесс коалесценции и дробления жидкой фазы. Пройдя БВО, газожидкостный поток попадает в БС, снабженный отбойником 3. В этом блоке происходят ударно-инерционное осаждение твердых частиц и сепарация частиц жидкой фазы, уносимых высокоскоростным газовым потоком из БВО. В БТО наблюдается противоточное движение фаз на крупнодырчатых провальных тарелках 2.

После разработки новых конструкций массообменных и пылеулавливающих аппаратов всесторонне изучаются их гидродинамические, массообменные и пылеулавливающие характеристики, а также проводится апробация в промышленных условиях.

Таким образом, предлагаемая методология направлена на исследование гидродинамических характеристик и конструктивных параметров разработанных конструкций массообменных и пылеулавливающих аппаратов, на определение оптимальных технико-экономических показателей, на проверку их в промышленных условиях и выработку рекомендаций по проектированию промышленных образцов.

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2011 році. – К. : Міністерство екології та природних ресурсів України, LAT & K. – 2012. – 258 с.
2. Волненко, А.А. Методология разработки и методика расчета аппаратов с регулярной подвижной насадкой / А.А. Волненко // Вестник НАН РК. – 1999. – №3. – С.25–29.
3. Коузов, П.А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности / П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрыбин. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.
4. Николаев, А.Н. Высокоэффективные вихревые аппараты для комплексной очистки больших объемов промышленных газовых выбросов / А.Н. Николаев, А.А. Овчинников, Н.А. Николаев // Химическая промышленность. – 1992. – №9. – С.540–544.
5. Товажнянський, Л.Л. Інтенсивні апарати со стабілізованим шаром пени для очистки отходящих газов: моногр. / Л.Л. Товажнянський, В.Ф. Моисеев. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 228 с.
6. Заминян, А.А. Абсорберы с псевдооживленной насадкой / А.А. Заминян, В.М. Рамм. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
7. Тепломасообмінний апарат: деклараційний патент на винахід. № 32340 А Україна, МПК В 01 J 19/32 / Пляцук Л.Д., Гурець Л.Л. №99042049; Заявлено 13.04.1999; Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7-ІІ. – 4 с. іл.
8. Деклараційний пат. 57669 А Україна, МКИ В 01 D 47/02. Апарат для мокрого очищення газів: Деклараційний пат. 57669 А Україна, МКИ В 01 D 47/02 / Пляцук Л.Д., Лазненко Д.О., Гурець Л.Л. (Україна), Осам Мостафа Махмуд Кетанех (JO); Сумський державний університет. – № 2002108337; Заявл. 22.10.2002; Опубл. 16.06.2003; Бюл. № 6. – 3 с.ил.

## References

1. National report on the state of the environment in Ukraine in 2011. – K.: Ministry of ecology and natural resources of Ukraine, LAT & K. – 2012. – 258 p.
2. Volnenko, A.A. Development methodology and procedure of mobile devices with a regular nozzle / A.A. Volnenko // Bulletin of the National Academy of Sciences of Kazakhstan. – 1999. – Vol. 3. – P. 25–29.
3. Kouzov, P.A. Cleaning from dust, gas and air in the chemical industry / P.A. Kouzov, A.D. Malgin, G.M. Skryabin. – L.: Chemistry, 1982. – 256 p.
4. Nikolaev, A.N. Highly efficient vortex apparatus for cleaning large volumes of complex industrial gas emissions / A.N. Nikolaev, A.A. Ovtchinnikov, N.A. Nikolaev // Chemicals Industry. – 1992. – Vol. 9. – P. 540–544.
5. Tovazhnjanskij, L.L. Intensive devices with a stable layer of foam for cleaning of off-gases: monogr. / L.L. Tovazhnjanskij, Moiseev, V.F., V.P. Bajratchnij, V.P. Chaporev. – Kharkiv: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2003.
6. Zaminjan, A.A. Absorbers with псевдооживленной nozzle / A.A. Zaminjan, V.M. Ramm. – M.: Chemistry, 1980.
7. HEAT AND MASS TRANSFER DEVICE, UK Patent 32340, 01 J 19/32 / Plyatsuk L.D., Gurets L.L.; assignees Sumy State University. – № 99042049; publication date: 2000-12-15.
8. Device for wet gas cleaning, UK Patent 57669, 01 D 47/02 / Plyatsuk L.D., Laznenko D.O., Gurets L.L., Osama Mostafa Mahmoud Kyetanyeh; SSU. assignees Sumy State University. – № 2002108337, publication date: 2003-06-16.

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»  
Украина, 61002, г. Харьков-2, ул. Фрунзе, 21

**Трошин Алексей Георгиевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры интегрированных технологий,  
процессов и аппаратов  
E-mail: ipitak@rambler.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

**Камбург Владимир Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: kamburg@rambler.ru

National Technical University «Kharkiv  
Polytechnic Institute»  
Ukraine, 61002, Kharkiv-2, 21, Frunze St.

**Troshin Aleksey Georgievich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department integrated technologies,  
processes and apparatus  
E-mail: ipitak@rambler.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

**Kamburg Vladimir Grigor'evich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Information-computing systems»  
E-mail: kamburg@rambler.ru

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ОТЖИМА ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО УРОВНЮ СОДЕРЖАНИЯ ПЛЕНОЧНОЙ ВЛАГИ

А.Г. Трошин, В.Г. Камбург

Получены математические модели, позволяющие оценить содержание пленочной влаги и влажность осадка, образующегося в процессе центробежного отжима, в предположении, что движение жидкой фазы происходит в виде пленок по поверхности частиц твердой фазы, на основании чего можно прогнозировать и управлять влажностью осадка промышленных центрифуг непрерывного действия, пользуясь результатами лабораторных исследований обезвоживаемого материала.

*Ключевые слова:* центробежный отжим, математическое моделирование, оценка, пленочная влага, управление, влажность осадка.

## ASSESSMENT AND FORECAST FOR CONTROL OF THE PROCESS OF CENTRIFUGAL EXTRACTION OF GRANULAR MATERIALS BY THE CONTENTS OF A FILM MOISTURE

A.G. Troshin, V.G. Kamburg

Mathematical models to assess the content of film moisture and humidity sediment, resulting in the process of centrifugal extraction in the assumption that the motion of the liquid phase occurs in the form of films on the surface of the particles of solid phase. On the basis of the received results it is possible to predict and control the humidity of sludge industrial centrifuges continuous action using the results of laboratory researches of dewatering material.

*Keywords:* centrifugal spinning, mathematical modeling, assessment, film moisture management, humidity sediment.

Центробежное разделение суспензий получило широкое распространение, особенно в строительстве, химической технологии и других отраслях. Влажность осадка центрифуги является важнейшим показателем, поскольку дальнейшее его термическое обезвоживание сопряжено со значительными затратами тепловой энергии. В современных условиях экономически целесообразно проводить интенсификацию центробежного обезвоживания за счет форсирования режимных параметров центрифуги в

целях сокращения количества влаги, удаляемой с помощью сушки, или полного отказа от неё.

Обезвоживание в фильтрующих центрифугах можно условно разделить на следующие стадии [1]:

1. Образование осадка. На данном этапе удаляется наиболее слабосвязанная, так называемая «гравитационная» (которая подвижна под действием силы тяжести) влага.

2. Уплотнение осадка, сопровождающееся выжиманием жидкости из пор осадка, который представляет собой практически двухфазную систему.

3. Центробежный отжим. Во время отжима продолжается уплотнение осадка, происходят опускание уровня жидкости ниже уровня поверхности осадка и следующее за ним пленочное течение жидкости.

В третий период процесса осадок делается трехфазной системой из-за проникновения внутрь пор воздуха. Благодаря силам поверхностного натяжения возникают скопления жидкости в местах взаимного касания частиц, образуются кольцевые мениски (стыковая влага). Эти мениски сообщаются друг с другом так, что жидкость может перетекать от одного мениска к другому. Движение жидкости в сторону увеличения радиуса вращения происходит в форме пленок.

Пленочное истечение жидкости и остаточная влажность осадка зависят от размеров и формы поровых каналов, характера частиц, изменения пористости и удельной поверхности по толщине осадка, угла смачивания и других термодинамических явлений, возникающих в дисперсных системах при освобождении части поверхности. Для отжима зернистых материалов принимаются следующие допущения: незначительное влияние уплотнения осадка на степень обезвоживания, продолжительность отхода гравитационной влаги мала по отношению к общей продолжительности процесса, пренебрежение влагой капиллярного подъема [2].

Во время центробежного отжима частично удаляется жидкость, удерживаемая молекулярными силами. Этот период является самым медленным в связи с уменьшением энергетического потенциала, обуславливающего процесс, и увеличением сопротивления движению жидкости из-за действия молекулярных сил. Процесс центробежного отжима можно наблюдать в центрифугах фильтрующего типа, комбинированных (типа SVS), а также в центрифугах типа ОГШ.

Процесс центробежного отжима во многом определяет влажность осадка. Прогнозирование эффективности этого процесса является актуальной научно-технической задачей. Точный расчет влажности осадка практически невозможен. В то же время делаются многочисленные попытки, цель которых не столько точно рассчитать влажность осадка, сколько показать степень влияния тех или иных параметров на содержание жидкой фазы в осадке [например, 10].

Влагу, находящуюся в осадке после центробежного отжима можно разделить на три основных класса:

1) влага, не удаляемая при центробежном отжиме (при самом высоком факторе разделения и бесконечном времени пребывания), её содержание характеризуется показателем максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ) [3];

2) стыковая и пленочная влага, не удаляемая при данном факторе разделения и бесконечном времени пребывания;

3) пленочная влага, стекающая с поверхности твердых частиц. Её движение подчиняется законам гидродинамики.

Для выражения содержания влаги в осадке наряду с показателем влажности часто пользуются показателем «насыщенность» – отношение объема пор, занятых водой, к общему объему пор в осадке.

Для определения насыщенности осадка в процессе центробежного отжима известна зависимость [4]:

$$S_{пл} + S_{ст} = (S_{пл} + S_{ст})_{\infty} + \frac{2f_0}{3\varepsilon_{oc}} \cdot \left[ \frac{vh}{Fr\tau g} \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где  $S_{пл}$ ,  $S_{ст}$  – соответственно, насыщенность пленочной и стыковой влагой;  $(S_{пл} + S_{ст})_{\infty} = S_{\infty}$  – суммарная пленочная и стыковая влага, не отделяемая при данной интенсивности центробежного поля при бесконечном времени центрифугирования;  $\varepsilon_{oc}$  – пористость осадка;  $f_0$  – удельная поверхность твердой фазы;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкой фазы;  $h$  – толщина слоя осадка;  $\tau$  – время пребывания осадка в роторе;  $Fr$  – фактор разделения;  $g$  – ускорение свободного падения.

Предложена формула [5] для определения насыщенности осадка при малом времени пребывания:

$$S = \frac{f_0 h_0}{\varepsilon_{oc}} \cdot \left( 1 - \frac{h_0^2 Fr g \tau}{\nu h} \right) \quad (2)$$

при 
$$\tau < \frac{h\nu}{Frgh_0^2}, \quad (3)$$

где  $h_0$  – полуширина канала при моделировании пористой среды системой плоских каналов.

Практическое использование формулы (2) затруднено, поскольку отсутствуют какие-либо указания о выборе значения  $h_0$ . На основе численного анализа установлено, что при  $h_0 \geq 10$  мкм, маловязкой жидкой фазе (вода), времени пребывания более 0,1с и факторе разделения более 200, характерных для современных центрифуг, формула (2) не найдет применения. Однако она может быть актуальна для высоковязкой жидкой фазы, такой, как например, патока.

В [1] с помощью формулы Козени – Кармана в виде

$$\alpha_V = f_0^2 / 0,2\varepsilon_{oc}^3 \quad (5)$$

при подстановке (5) в (1), а также с учетом того, что показатель степени может отличаться от 0,5, получено:

$$S_{пл} + S_{ст} = (S_{пл} + S_{ст})_{\infty} + c \cdot \left[ \frac{\nu \alpha_V h \varepsilon_{oc}}{Fr g \tau} \right]^m, \quad (6)$$

где  $\alpha_V$  – удельное объемное сопротивление осадка.

Постоянные  $c$  и  $m$  определяются экспериментально. Существует мнение, что каждая из переменных имеет свой показатель степени, значение которого зависит от режима центрифугирования и свойств осадка [9].

Для определения суммарного содержания пленочной и стыковой влаги, не удаляемой при бесконечной длительности процесса, предложено уравнение [6]:

$$(S_{пл} + S_{ст})_{\infty} = \left( \frac{\sigma \cos \nu}{\rho_j g} \cdot \frac{f_0}{Fr d_{cp}} \right)^{0,25} \frac{1 - \varepsilon_{oc}}{\varepsilon_{oc}}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\nu$  – краевой угол смачивания.

Согласно [7, 8], при центробежном отжиме жидкая фаза не вытекает из капилляров слоя осадка, а в основном стекает с поверхности частиц. Именно этот процесс занимает основное время, и от него зависит конечная влажность осадка. Толщина пленки  $\delta$ , стекающей с поверхности частиц средним размером  $d_{cp}$ :

$$\delta = \sqrt{\frac{3\delta_0^2 R \nu (r - R_c)}{r [\delta_0^2 \omega^2 R \tau + 3\nu (R - R_c)]}}, \quad (8)$$

где  $R$ ,  $R_c$ ,  $r$  – радиусы соответственно поверхности ротора, внутренней поверхности слоя осадка, текущей цилиндрической поверхности внутри слоя осадка;  $\delta_0$  – начальная

толщина пленки жидкости, в зависимости от укладки частиц в слое осадка равна от  $(0,08-0,12)d_{cp}$  для центрифуг периодического действия до  $(0,16-0,21)d_{cp}$  для инерционной конической центрифуги;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Формула (8) применялась для оценки толщины пленки сиропа на поверхности частичек сахара как ориентировочное соотношение начальной толщины пленки жидкости и среднего размера частиц. Оно соответствует содержанию сиропа в утфеле в начальный момент отжима (после отхода гравитационной жидкости). Для других продуктов, имеющих более широкий диапазон дисперсности частиц, данное соотношение может и не выполняться, поскольку мелкие частицы займут пространство между более крупными.

Численный анализ формулы (8) показывает, что для маловязкой жидкой фазы  $\nu \approx 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, средний диаметр частиц более  $10^{-4}$  м при времени пребывания  $\tau \geq 2$  с, толщина пленки жидкой фазы практически не зависит от начальной толщины  $\delta_0$ . Кроме того, значение члена  $\delta_0^2 \omega^2 R \tau$  более чем на порядок превышает значение  $3\nu(R - R_c)$ . Пренебрегая последним, а также считая толщину слоя осадка малой в сравнении с радиусом ротора (и, как следствие,  $r/R \approx 1$ ), можно существенно упростить формулу (8):

$$\delta = \sqrt{\frac{3\nu(r - R_c)}{\omega^2 R \tau}} = \sqrt{\frac{3\nu(r - R_c)}{Fr g \tau}}. \quad (9)$$

Определим среднюю толщину пленки жидкой фазы по толщине слоя осадка  $h$ :

$$\bar{\delta} = \frac{\int_{R_c}^{R_c+h} \sqrt{\frac{3\nu(r - R_c)}{\omega^2 R \tau}} dr}{h} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\nu h}{\omega^2 R \tau}}. \quad (10)$$

Формула (10) получена для случая вертикальной поверхности, по которой стекает жидкая фаза, однако поверхности граней отдельных частиц осадка наклонены под различными углами случайным образом.

Отсюда можно определить насыщенность осадка пленочной влагой, стекающей с поверхности частиц:

$$S = \frac{f_0}{\varepsilon} \bar{\delta} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_0}{\varepsilon} \sqrt{\frac{\nu h}{\omega^2 R \tau}}. \quad (11)$$

Если известна удельная поверхность частиц на килограмм твердой фазы  $f_{0m}$ , то влажность осадка, соответствующая пленочной влаге, составляет:

$$W_{пл} = \frac{f_{0m} \rho_{ж} \bar{\delta}}{1 + f_{0m} \rho_{ж} \bar{\delta}} = \frac{f_{0m} \rho_{ж} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_0}{\varepsilon} \sqrt{\frac{\nu h}{\omega^2 R \tau}}}{1 + f_{0m} \rho_{ж} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_0}{\varepsilon} \sqrt{\frac{\nu h}{\omega^2 R \tau}}}. \quad (12)$$

Как видно, толщина пленки, а следовательно, и общее количество воды, стекающей при центробежном отжиме, не зависит напрямую от среднего объемного сопротивления слоя осадка, как это было в уравнении (6). Также удалось уйти от необходимости выбора  $\delta_0$  (для маловязкой жидкой фазы).

Влияние величины центробежного ускорения, времени пребывания, кинематической вязкости и толщины слоя осадка на насыщенность осадка учитывается уравнениями (11) и (1) в одинаковом виде. В то же время постоянный коэффициент в

формуле (11) в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем в формуле (1). Данное обстоятельство требует экспериментального подтверждения.

Пользуясь формулой (12), можно прогнозировать влажность осадка и управлять режимом работы центрифуг непрерывного действия:

$$W = W_{\infty} + W_{пл} = MMB + (W_{пл} + W_{ст})_{\infty} + W_{пл}, \quad (13)$$

где  $W_{\infty}$  – влажность осадка при бесконечном времени пребывания осадка при данном факторе разделения;  $MMB$  – максимальная молекулярная влагоемкость, показатель, учитывающий количество влаги в материале, не удаляемой механическими способами;  $(W_{пл} + W_{ст})_{\infty}$  – суммарное количество пленочной и стыковой влаги, не удаляемой при данном факторе разделения и бесконечном времени пребывания.

В показатель  $W_{\infty}$  войдут такие виды влаги, как внутренняя, связанная молекулярными силами, капиллярно-стыковая, не удаляемые при данном факторе разделения. Показатель  $W_{\infty}$  наиболее точно можно определить путем центрифугирования материала в лабораторной стаканчиковой центрифуге с фильтрующими стаканами.

**Результаты и выводы.** Выделены основные стадии и получены математические модели процесса центробежного отжима зернистых материалов, позволяющие оценить и предсказать содержание пленочной влаги в результате процесса обезвоживания, а следовательно, управлять процессом центробежного отжима зернистых материалов по уровню содержания пленочной влаги в осадках промышленных центрифуг непрерывного действия, пользуясь соответствующими результатами лабораторных исследований обезвоживаемого материала.

#### Список литературы

1. Соколов, В.И. Центрифугирование / В.И. Соколов. – М.: Химия, 1976. – 407 с.
2. Шкоропад, Д.Е. Центрифуги и сепараторы для химических производств / Д.Е. Шкоропад, О.П. Новиков. – М.: Химия, 1987. – 256 с.
3. Бочков, Ю.Н. Оценка эффективности механических способов обезвоживания угольной мелочи / Ю.Н. Бочков, Л.С. Зарубин // Теория и практика обезвоживания угольной мелочи / МУП СССР, АН СССР. – М.: Наука, 1966. – С. 5–19.
4. Nenner, E. Amer / E. Nenner, A. Storrow // Inst. Chem. Eng. J. – 1958. – №4. – P.305–308.
5. Мошинский, А.И. Применение распределения пор по размерам к оценке отхода жидкости из осадков / А.И. Мошинский, В.Д. Лунев, М.И. Курочкина // ЖПХ. – 1983. – №11. – С.2482–2487.
6. Batel, W. Vorausberechnung der Restfeuchtigkeit bei der mechanischen Flüssigkeitsabtrnnung // Chem.-Ing.-Techn. – 1955. – V.27. – №8/9. – P.497–501.
7. Терешин, Б.Н. Особенности работы конических центрифуг непрерывного действия / Б.Н. Терешин // Сахарная промышленность. – 1981. – №2. – С.27–29.
8. Терешин, Б.Н. Стеkanie вязких жидкостей с поверхности кристаллов при центрифугировании / Б.Н. Терешин // Труды ВНИИСПа. – 1974. – Вып. 21. – С.16–20.
9. Lavanchy, A.C., Keith F.W. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2nd ed. – 1964. – V.4. – P.712–758.
10. Камбург, В. Г. Обобщённая модель для расчёта полей пересыщения в каналах различной конфигурации / В.Г. Камбург, Н.В. Шепталин // Интегральные преобразования для краевых задач: сб. науч. работ / Институт математики Нац. акад. наук Украины. – Киев, 1996. – С.21–26.

## References

1. Sokolov, V.I. Centrifugation / V.I. Sokolov. – M.: Chemistry, 1976. – 407 p.
2. Shkoropad, D.E. Centrifuges and separators for chemical production / D.E. Shkoropad, O.P. Novikov. – M.: Chemistry, 1987. – 256 p.
3. Bochkov, J.N. Evaluating the effectiveness of mechanical methods of dewatering of fine coal / J.N. Bochkov, L.S. Zarubin // Theory and Practice of dewatering of fine coal / CBM USSR Academy of Sciences. – M.: Science, 1966. – P. 5–19.
4. Nenninger, E. Amer / E. Nenninger, A. Storrow // Inst. Chem. Eng. J. – 1958. – №4. – P.305–308.
5. Moshinsky, A.I. Application of the pore size distribution to the estimation of waste liquid from the sediment / A.I. Moshinsky, V.D. Lunev, M.I. Kurochkin // Zh. – 1983. – № 11. – P.2482–2487.
6. Batel, W. Vorausberechnung der Restfeuchtigkeit bei der mechanischen Flüssigkeitsabtrnnung/ W. Batel // Chem.–Ing.-Techn. – 1955. – V.27. – №8/9. – P.497–501.
7. Tereshin, B.N. Features of the conical centrifuge continuous action / B.N. Tereshin // Sugar Industry. – 1981. – № 2. – P.27–29.
8. Tereshin, B.N. Draining viscous fluids from the surface of the crystals in a centrifuge / B.N. Tereshin // Proc VNIISPa. – 1974. – Vol. 21. – P.16–20.
9. Lavanchy, A.C., Keith F.W. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2nd ed. – 1964. – V.4. – P.712–758.
10. Kamburg, V.G. generalized model for calculating the saturation fields in channels of various configurations / V.G. Kamburg, N.V. Sheptalin // Integral transforms for boundary value problems: sb.nauchn.rabot / Institute of Mathematics, National. Acad. Sciences of Ukraine. – Kyiv, 1996. – P.21–26.



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

**Горшков Валентин Иванович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»

**Святкина Анна Александровна,**  
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»

**Мирошниченко Денис Сергеевич,**  
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»

**Тараканов Олег Вячеславович,**  
доктор технических наук, профессор

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

**Gorshkov Valentin Ivanovich,**  
Candidate of Science, Associate Professor  
of the department «Heat, gas supply and  
ventilation»

**Svyatkina Anna Aleksandrovna,**  
Postgraduate student of the department  
«Heat, gas supply and ventilation»

**Miroshnichenko Denis Sergeevich,**  
Postgraduate student of the department  
«Heat, gas supply and ventilation»

**Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,**  
Doctor of Sciences, Professor

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА ВОЗДУХА В СИСТЕМЕ ВЕНТИЛЯЦИИ

В.И. Горшков, А.А. Святкина, Д.С. Мирошниченко, О.В. Тараканов

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований газодинамического регулятора, а также теоретические основы определения крутящего момента на пластине регулятора. Приведена математическая модель крутящего момента на пластине газодинамического регулятора расхода воздуха.

*Ключевые слова: система вентиляции, регулирование расхода воздуха, газодинамическое регулирование, крутящие моменты элементов газодинамического регулятора расхода воздуха.*

## CHOICE OF GASDYNAMICAL AIR FLOW REGULATOR PARAMETERS IN THE VENTILATION SYSTEM

V.I. Gorshkov, A.A. Svyatkina, D.S. Miroshnichenko, O.V. Tarakanov

The results of experimental studies of gas-dynamic control and theoretical basis for determining the torque on the regulator plate are shown. Mathematical model of torque plate gasdynamic flow rate controller is given.

*Keywords: ventilation, air flow control, gas-dynamic regulation, torques elements gasdynamic flow rate controller.*

Определялись оптимальные формы и размеры пластины в прямооточной части тройника и коэффициенты местных сопротивлений тройника с пластиной. Целью первого этапа исследований являлось измерение крутящих моментов, измерение параметров воздушного потока в вентиляционной сети.

Для исследования была разработана и изготовлена экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1, основными элементами которой являются: тройник с регулятором расхода; магистральный воздухопровод; воздухопровод ответвления; вентилятор с электродвигателем. В данной установке применяется вентилятор радиального типа. Электродвигатель асинхронный (фирма VOLTA) типа АОЛ-011-2 мощностью 80 Вт. Частота вращения электродвигателя  $n=2950$  об/мин. Полное давление вентилятора составляет 100 Па, расход воздуха – 260 м<sup>3</sup>/ч. Диаметр воздухопроводов в установке 104 мм, соответственно радиус сечения воздухопроводов равен 52 мм.

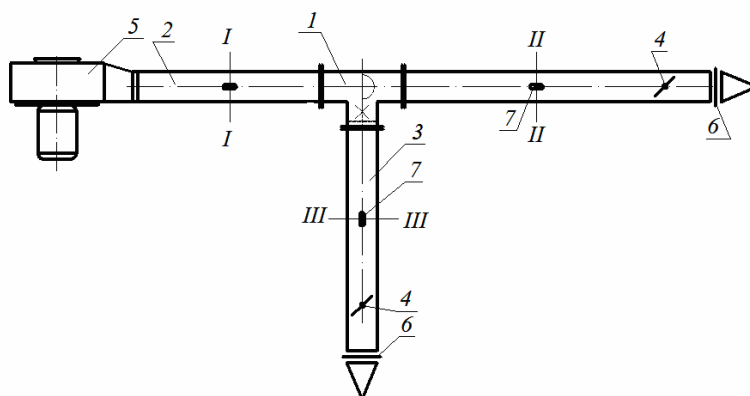


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – тройник с газодинамическим регулятором; 2 – магистральный воздуховод;  
 3 – воздуховод отвления; 4 – дроссельные заслонки; 5 – вентилятор с электродвигателем;  
 6 – воздухораспределительные решетки; 7 – лючки питометражные

Для регулирования расхода воздуха, проходящего по воздуховодам вентиляционной системы, используются дроссельные заслонки. Для проведения измерений параметров воздушного потока в сечениях воздуховодов предусмотрены лючки питометражные. Воздухораспределительные решетки закреплены на выходе воздуха из воздуховодов.

На экспериментальной установке (см. рис. 1) измерения параметров воздуха (скорость, расход, полное, статическое и динамическое давление) производились в сечениях I-I, II-II и III-III. Средством для измерений служили многофункциональный прибор АМИ-300 в комплекте с пневмометрической трубкой Пито и многофункциональным зондом (для измерения скорости, влажности и температуры). Методика измерения параметров воздуха в вентиляционной сети принята согласно ГОСТ 12.3.018–79.

Основной целью при проведении эксперимента являлось определение крутящего момента на пластине (рис. 2), создаваемого воздушным потоком. В данной схеме аэродинамическая сила  $N_x$ , действующая на пластину, помещенную в воздушный поток, определится как:

$$N_x = S_{\text{мпл}} \cdot \left( \frac{\rho \cdot v_{\text{пл}}^2}{2} \right) \cdot c_{\text{хпл}}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{мпл}}$  – площадь миделевого сечения пластины;  $\rho$  – плотность воздуха;  $v_{\text{пл}}$  – скорость движения воздушного потока в сечении пластины;  $c_{\text{хпл}}$  – аэродинамический коэффициент формы пластины.

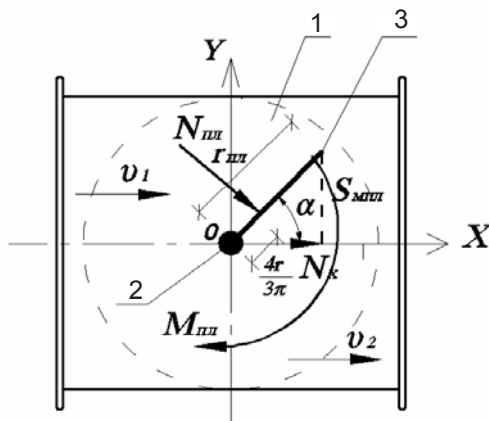


Рис.2. Схема сил и моментов, действующих на пластину регулятора:

- 1 – тройник; 2 – ось; 3 – пластина

Применительно к рассматриваемой схеме (см. рис. 2), в которой пластина представляет собой форму полукруга, величина площади миделевого сечения равна:

$$S_{\text{мпл}} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r_{\text{пл}}^2 \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $r_{\text{пл}}$  – радиус полукруга;  $\alpha$  – угол наклона пластины к оси направления движения потока.

Тогда получим:

$$N_x = c_{\text{хпл}} \cdot \frac{\pi \cdot r_{\text{пл}}^2}{2} \cdot \left( \frac{\rho \cdot v_{\text{пл}}^2}{2} \right) \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Точка приложения равнодействующей силы  $N_{\text{пл}}$  для пластины находится от центра полукруга на расстоянии  $\frac{4}{3\pi} r_{\text{пл}}$  [2].

Пластина, помещенная в воздушный поток и закрепленная на оси, под действием силы  $N_x$  будет стремиться поворачиваться по направлению движения потока. При этом относительно оси возникает крутящий момент  $M_{\text{пл}}$ . Учитывая, что момент  $M_{\text{пл}}$  равен произведению нормальной силы  $N_{\text{пл}} = N_x \cdot \sin \alpha$  на плечо  $\frac{4}{3\pi} r_{\text{пл}}$ , окончательно получим:

$$M_{\text{пл}} = \frac{1}{3} \cdot c_{\text{хпл}} \cdot r_{\text{пл}}^3 \cdot \left( \frac{\rho \cdot v_{\text{пл}}^2}{2} \right) \cdot \sin^2 \alpha. \quad (4)$$

Зависимость (4) справедлива для одномерного потока. Применительно к рассматриваемой конструкции структура потока является сложной и нестационарной. Следовательно, действительное значение крутящего момента на пластине  $M_{\text{пл}}$  в реальной конструкции может значительно отличаться от значений, рассчитанных по зависимости (4). Поэтому с целью установления степени адекватности расчетной зависимости с реальными значениями была разработана методика по определению  $M_{\text{пл}}$ .

Экспериментальное определение крутящего момента на пластине проводилось следующим образом. На ось закрепляется пластина (рис. 3), которая фиксируется под разным углом по направлению движения потока. При фиксированном угле наклона пластины выполнялось перекрытие предварительно приведенной в открытое положение регулирующей дроссельной заслонки (см. рис. 1). При этом происходит перераспределение воздушных потоков в стволе и ответвлении вентиляционной сети. Так, например, при полностью закрытой дроссельной заслонке в воздуховоде ствола скорость в нем падает, а в ответвлении возрастает. Изменение скорости происходит и в тройнике с регулятором расхода, что приводит к изменению силы давления потока воздуха на пластину. При каждом фиксированном положении дроссельной заслонки (см. рис. 1) и пластины (см. рис.3) снимаются показания величины давления передаточного механизма на электронные весы (тип ML-B04-100, точность измерений 0,01 г). По показаниям весов определяется крутящий момент:

$$M_{\text{пл}}^3 = l \cdot P \cdot g, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (5)$$

где  $l$  – плечо, равное 0,113 м;  $P$  – сила давления передаточного механизма (см. рис. 3) на весы, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, Н/кг.

В результате обработки опытных данных измерений скоростей в воздуховодах и крутящего момента на пластине регулятора в прямоточной части тройника построены графики зависимостей момента на пластине  $M_{\text{пл}}^3$  от средних скоростей  $v_{\text{ср}i}$  и угла поворота пластины  $\alpha$  (рис. 4).

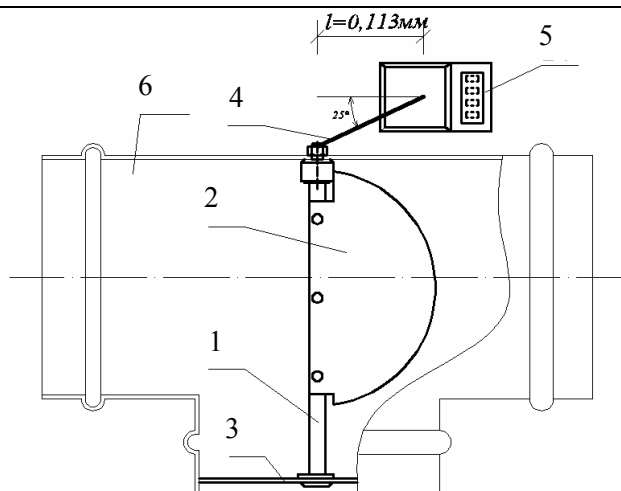


Рис. 3. Испытания пластины регулятора в прямооточной части тройника:  
1 – ось; 2 – пластина; 3 – неподвижный осесимметричный сектор; 4 – передаточный механизм;  
5 – электронные весы; 6 – тройник

На рис. 4 обозначены кривые:

1 – при скоростях  $v_{срi}=8,002; 5,4; 2,786$  м/с, замеренных в сечениях I–I, II–II, III–III (см. рис. 1) соответственно;

2 – при  $v_{срi}=7,948; 3,818; 4,106$  м/с;

3 – при  $v_{срi}=7,878; 2,95; 4,978$  м/с;

4 – при  $v_{срi}=7,778; 2,158; 5,744$  м/с;

5 – при  $v_{срi}=7,635; 1,634; 6,274$  м/с.

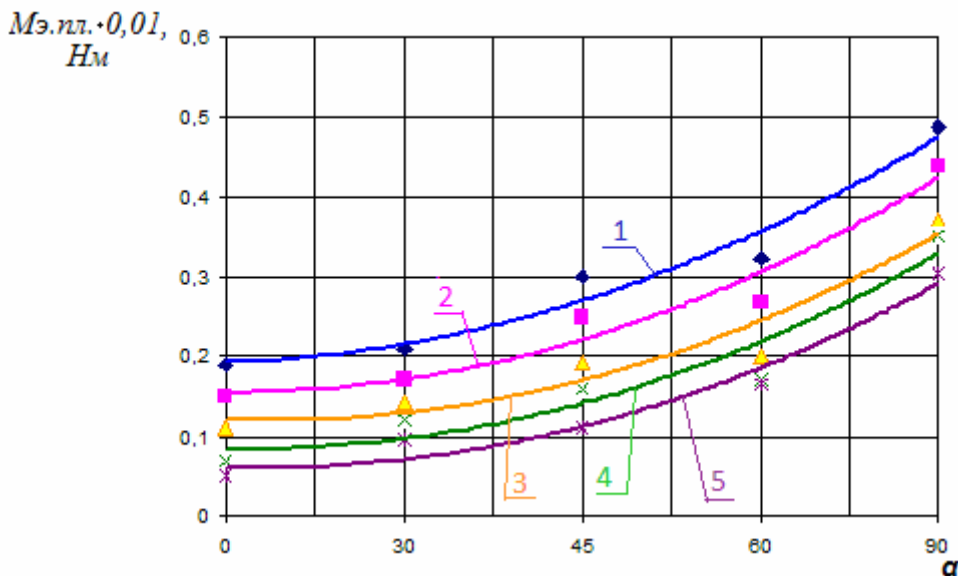


Рис. 4. Крутящий момент в зависимости от угла поворота пластины и скоростей потока

Анализ кривых (см. рис. 4) показывает, что они имеют параболическую форму. Аппроксимация графиков дает уравнения следующего вида:

➤ для кривой 1:  $M_{пл}^3 = 0,0159\alpha^2 - 0,0245\alpha + 0,2009;$  (6)

➤ для кривой 2:  $M_{пл}^3 = 0,0171\alpha^2 - 0,0349\alpha + 0,1723;$  (7)

➤ для кривой 3:  $M_{пл}^3 = 0,0167\alpha^2 - 0,0423\alpha + 0,1463;$  (8)

➤ для кривой 4:  $M_{пл}^3 = 0,0164\alpha^2 - 0,0376\alpha + 0,106;$  (9)

➤ для кривой 5:  $M_{пл}^3 = 0,0162\alpha^2 - 0,0395\alpha + 0,0851.$  (10)

Третье слагаемое в уравнениях (6) – (10) представляет собой степень смещения пересечения опытных кривых с осью  $M_{пл}^3$  при угле поворота пластины  $\alpha=0^\circ$ . С математической точки зрения эти смещения определяют степень влияния скорости воздушного потока на величину крутящего момента, то есть являются второй функцией в общей зависимости для  $M_{пл}^3=M(v_{ср})$ . Тогда будет справедливо записать математическое ожидание функции в виде:

$$M_{пл}^{3,ср} = M[M_{пл}^{3,ср}] = 0,01646\alpha^2 - 0,03576\alpha + 0,14212. \quad (11)$$

Обозначим третье слагаемое постоянной

$$G = a \cdot v_{ср}, \quad (12)$$

где  $v_{ср}$  – средняя скорость в сечениях I–I, II–II и III–III.

При средней скорости в сечениях I–I, II–II и III–III  $v_{ср}=5,3$  м/с:  $0,14212=a \cdot 5,3$ . Тогда  $a=0,0268$ .

Используя взаимосвязь  $M_{пл}$  от  $\alpha$  и  $v_{ср}$ , получим:

$$M_{пл}^{3,ср} = 0,01646\alpha^2 - 0,03576\alpha + 0,0268 v_{ср}. \quad (13)$$

Анализ зависимостей  $M_{пл}^3 = M(v_{ср}, \alpha)$  кривых (см. рис. 4) показывает, что данные эксперимента по величине  $M_{пл}^3$  являются завышенными. Так, например, при угле поворота пластины  $\alpha=0^\circ$  (поворот пластины отсутствует) эксперимент показывает наличие крутящего момента. С физической точки зрения это не соответствует действительности, так как при отсутствии угла атаки должна отсутствовать подъемная сила, а следовательно, для исследуемой конструкции должен отсутствовать момент  $M_{пл}^3$ . Однако такой подход будет справедливым, если рассматривать одномерное течение потока. В исследуемой конструкции газодинамического регулятора в области пластины происходит интенсивное перестроение структуры потока от одномерного к сложному трехмерному течению. Поэтому будет логичным для определения реальной величины управляющего момента на пластине полученные значения  $M_{пл}^3$  уменьшить на величину, соответствующую значению момента при угле поворота пластины  $\alpha=0^\circ$ . Например, для кривой 1 (см. рис. 4) при угле поворота пластины  $\alpha=90^\circ$  получаем  $M_{пл}^3 = 0,48 \cdot 10^{-2}$  Н·м, а при  $\alpha=0^\circ$  –  $M_{пл}^3 = 0,19 \cdot 10^{-2}$  Н·м. Тогда действительное значение  $M_{пл}^3$  при  $\alpha=90^\circ$  будет равно:  $0,48 \cdot 10^{-2} - 0,19 \cdot 10^{-2} = 0,29 \cdot 10^{-2}$  Н·м.

Из (4) при  $r_{пл} = 0,05$  м,  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>,  $\alpha = 90^\circ$  получим:

$$M_{пл} = c_{хпл} \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot v_{пл}^2, \quad (14)$$

и при  $c_{хпл} = 1$ :

$$v_{пл} = \sqrt{\frac{M_{пл}}{5 \cdot 10^{-5}}}, \text{ м/с.} \quad (15)$$

Для кривой 1 найдем:

$$v_{пл} = \sqrt{\frac{0,29 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-5}}} = 7,6 \text{ м/с.}$$

Это скорость потока на пластине, которую в условиях исследуемой конструкции прямыми измерениями получить сложно. Тем не менее, если предположить, что действительная скорость будет близка к средней скорости потока для сечений I–I и II–II, тогда

$$v_{пл,ср}^{I,II} = \frac{v^{I-I} + v^{II-II}}{2} = \frac{8,002 + 5,4}{2} = 6,7 \text{ м/с.}$$

Таким образом, в рамках данных исследований была разработана экспериментальная установка (см. рис. 1), на которой выполнены опытные определения параметров газодинамического регулятора в тройнике системы вентиляции. По результатам исследований были получены зависимости величины крутящего момента, создаваемого пластиной, жестко закрепленной на оси и помещенной в тройник, от угла поворота пластины и скорости потока. В результате математической обработки получено расчетное уравнение (13), характеризующее влияние угла поворота пластины и скорости движения потока на величину крутящего момента. Расхождение опытных и теоретических данных составило не более 4 %. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании устройств, аналогичных газодинамическому регулятору.

#### Список литературы

1. Горшков, В.И. Аэродинамические силы и моменты в регуляторе расхода воздуха / В.И. Горшков, А.А. Святкина // Сборник XIII Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2012. – С. 46–48.
2. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Ч. 1 / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1962.

#### References

1. Gorshkov, V.I. Aerodynamic forces and moments in the air flow regulator / V.I. Gorshkov, A.A. Svyatkina // Collection of the XIII International Scientific and Practical Conference. – Penza, 2012. – P.46–48.
2. Yablonsky, A.A. Course of Theoretical Mechanics. Part 1 / A.A. Yablonsky, V.M. Nikiforov. – M.: Higher School, 1962.

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

**Баканова Светлана Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: SvBakanova@mail.ru

**Ерёмкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
советник при ректоре, зав. кафедрой  
«Теплогасоснабжение и вентиляция»  
E-mail: eremkin@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

**Bakanova Svetlana Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Heat and gas supply»  
E-mail: SvBakanova@mail.ru

**Eremkin Alexander Ivanovich**,  
Doctor of Science, Professor, Adviser at a  
rector, Head of the department «Heat and gas  
supply»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

## РЕФРИЖЕРАТОРНЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

С.В. Баканова, А.И. Еремкин

Приводятся экспериментальные данные, полученные на объемной модели загруженного помещения трюма. Для воздушного охлаждения вертикальной системой воздухораспределения выявлено оптимальное решение конструктивно-технологического оформления наружных ограждений.

*Ключевые слова: рефрижераторные помещения, воздухораспределение, воздухообмен.*

## AIR COOLING IN REFRIGERATED PREMISES, EQUIPPED WITH VERTICAL AIR DISTRIBUTION SYSTEM

S.V. Bakanova, A.I. Eremkin

The paper deals with experimental data received on a three-dimensional model of the loaded premises of the hold. For air cooling of the vertical air distribution system the optimal solution constructive - technological design of external walls – is found.

*Keywords: refrigerated space, air distribution, air exchanges.*

Использование воздуха в качестве хладоносителя получило в последнее время широкое распространение при хранении разнообразной скоропортящейся продукции как в стационарных хранилищах [1], так и в процессе её транспортировки [2]. В России, например, около 80 % рефрижераторных трюмов оборудованы системами воздушного охлаждения.

В основном, при организации воздухообмена в слое охлаждаемой продукции наиболее широкое распространение получили вертикальные системы воздушного охлаждения с восходящим потоком воздуха [3]. В таких системах для эффективного отвода наружных теплопритоков между слоем продукции и наружными вертикальными ограждениями устраивают воздушные зазоры, которые образуют каналы для прохода воздуха (байпасы). Традиционно раздача воздуха в слой продукции производится через перфорированный напольный воздухораспределитель.

При известных достоинствах (равномерное распределение воздуха по площади, снятие теплопритоков с днища) вертикальные системы воздушного охлаждения с восходящим потоком воздуха имеют такие конструктивные недостатки, как сложность и большие капитальные затраты на изготовление перфорированного воздухораспределителя, потеря части полезного объёма на размещение последнего.

Технологические недостатки следующие: утепление верхних слоёв продукции вследствие втекания тёплого воздуха из боковых байпасов у вертикальных наружных ограждений (так, например, при транспортировке рыбной продукции в трюмах морских судов утепление верхних слоёв продукции вызывает увеличение общего температурного перепада до  $7^{\circ}\text{C}$ , что на  $4^{\circ}\text{C}$  выше нормативных значений).

Кроме того, при реализации вертикальной схемы воздухораспределения в трюмах морских судов возникают и другие технические недостатки:

- трудоёмкость при монтаже традиционной отделки наружных бортов вертикальными брусками – рыбинсами (для обеспечения воздушного зазора);
- нарушение герметизации зашивки борта (рыбинсы крепятся к борту шурупами), приводящее к увлажнению и увеличению теплопроводности изоляционного материала, к его последующему гниению.

Для устранения указанных недостатков, присущих вертикальной системе воздушного охлаждения с восходящим потоком воздуха, были проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях на специально сконструированной объёмной модели рефрижераторного помещения трюма (рис. 1). Подача воздуха осуществлялась с помощью центробежного вентилятора 1 высокого давления. Общий расход воздуха в установке регулировался шибером 10 и определялся с помощью пневмометрической трубки 9 и микроманометра 8. С помощью шиберов 5 и 12 предусматривалась совместная и раздельная подача воздуха в центральную и периферийные области штабеля продукции через отдельные плоские воздухопроводы с воздуховыпускающими решётками. Так как системы воздушного охлаждения работают на рециркуляцию, всасывающие и нагнетательные воздухопроводы экспериментальной установки были закольцованы. Положение нуля избыточного статического давления в распределительной сети изменялось с помощью шибера 10 и шиберов 5.

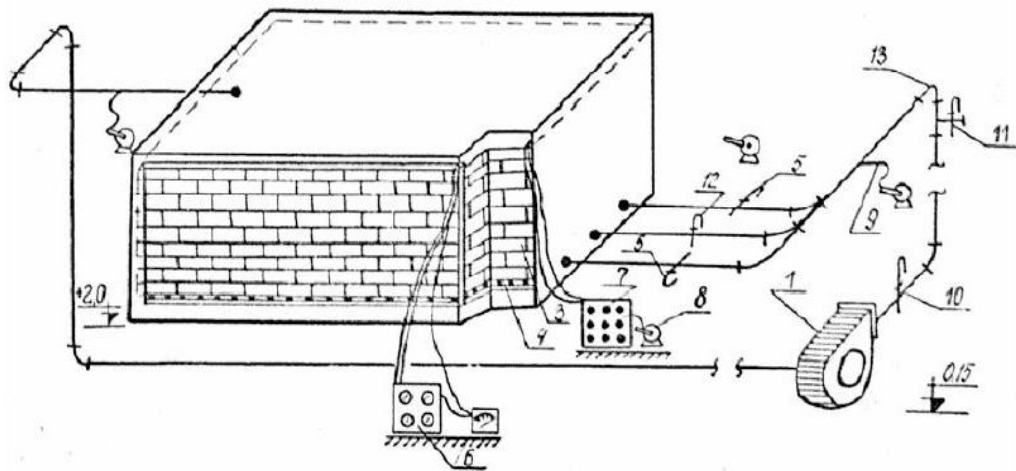


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – вентилятор; 2 – загруженное помещение (модель трюма); 3 – слой загрузки (штабель);
- 4 – перфорированный воздухопроводитель или воздухопроводы с воздуховыпускными решётками; 5, 10, 11, 12 – шиберы; 6 – многоточечный переключатель с термоанемометром;
- 7 – пневмопереключатель; 8 – микроманометры; 9 – пневмометрическая трубка;
- 13 – отвод с направляющими лопатками

Продольные ограждения модели, имитирующие наружные теплоограждения выполнялись прозрачными в виде деревянной рамы с двойным остеклением. Подачей определённой мощности на нихромовую спираль, натянутую между стёклами, добивались требуемого теплового потока в модель через наружные ограждающие конструкции. На внутренней поверхности теплоотдающих наружных ограждений (бортов) устанавливались различные варианты отделки с помощью рыбинсов.

Комплексные исследования по изучению взаимодействия фильтрационных потоков воздуха в штабеле продукции с наружными ограждениями показали целесооб-



разным применение рационального варианта оборудования помещений вертикальной системой воздухораспределения.

Взамен равномерной раздачи воздуха через перфорированную решётку предлагается применить плоские воздуховоды с отдельными равноудалёнными друг от друга воздухораздающими решётками. Предпосылкой к этому явились результаты исследований, показывающие, что структура штабеля способствует равномерному распределению фильтрационного потока уже в области, непосредственно прилегающей к воздуховыпускной решётке. На основании экспериментальных исследований изучения взаимодействия фильтрационных потоков воздуха с отделкой наружных ограждений установлено также, что горизонтальное расположение рыбинсов практически исключает утепление верхних слоёв продукции.

Поиск рационального варианта отделки наружных ограждений с помощью горизонтально расположенных рыбинсов (брусков) осуществлялся исходя из технологических и монтажных принципов: простота конструкции, её унификация; индустриализация и обеспечение герметизации зашивки борта. По результатам поисковых экспериментов установлен наиболее эффективный вариант отделки наружных ограждений рефрижераторных помещений с помощью горизонтальных профилированных брусков, располагаемых в шахматном порядке [4].

При необходимости (например, в трюмах) отделка наружных ограждений может быть выполнена съёмной в виде набора блоков, состоящих из деревянных профилированных брусков, соединённых между собой гибкой связью. Блоки крепятся на ограждениях с помощью крючков (в период ремонта или уборки помещения, перед приёмкой новой партии груза конструкция легко разбирается).

Эффективность предложенного решения выявлялась из сопоставления результатов экспериментальных исследований с традиционной вертикальной системой раздачи воздуха через перфорированный воздухораспределитель с отделкой наружных ограждений вертикальными брусками.

Из данных рис. 2 видно, что предложенное решение по оборудованию грузовых помещений вертикальной системой воздухораспределения позволяет существенно снизить общий перепад температуры воздуха в периферийных слоях штабеля продукции. Так, например, на судах: в трюме – на  $1,7^\circ\text{C}$ , а в твиндеке – на  $4^\circ\text{C}$ , в сравнении с традиционным вариантом. При этом наблюдается снижение перепада температур и по глубине штабеля в горизонтальных сечениях (рис.3). Так, на отметке  $h_x = 0,96$  перепад температуры в трюме составляет более  $2^\circ\text{C}$  при традиционном решении и  $0,6^\circ\text{C}$  – при предлагаемом варианте. Причём, в первом случае имеет место более глубокое утепление груза ( $1/4$  ширины штабеля), чем во втором ( $1/6$  ширины штабеля).

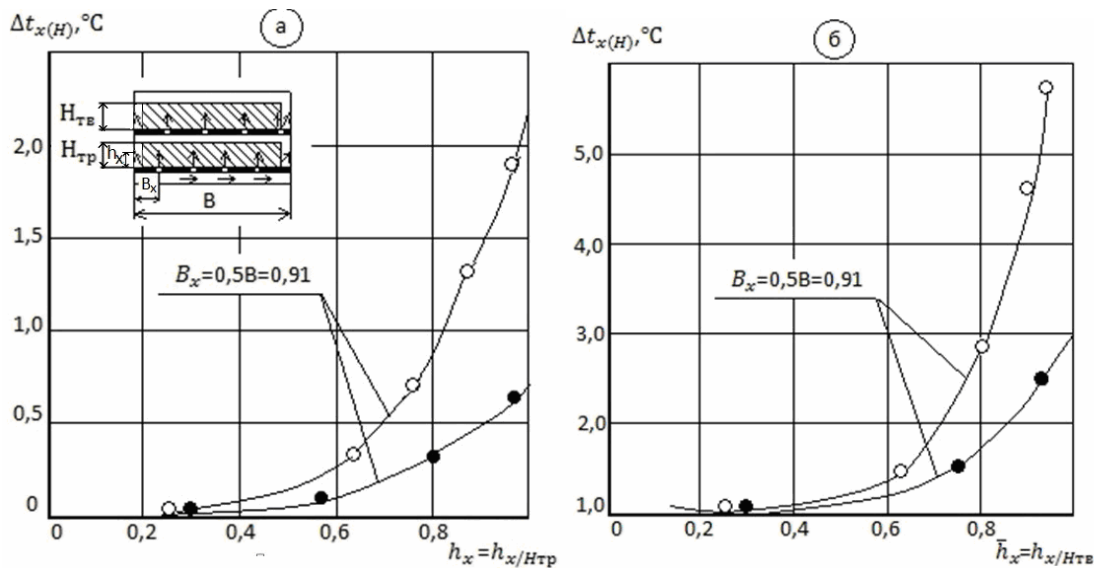


Рис. 2. Изменение температуры воздуха по высоте штабеля грузовых помещений на рефрижераторных судах: в трюме (а); в твиндеке (б) при  $B_x/0,5B=0,91$ :

—○— традиционный вариант раздачи воздуха и отделки наружных ограждений;  
—●— предлагаемый вариант

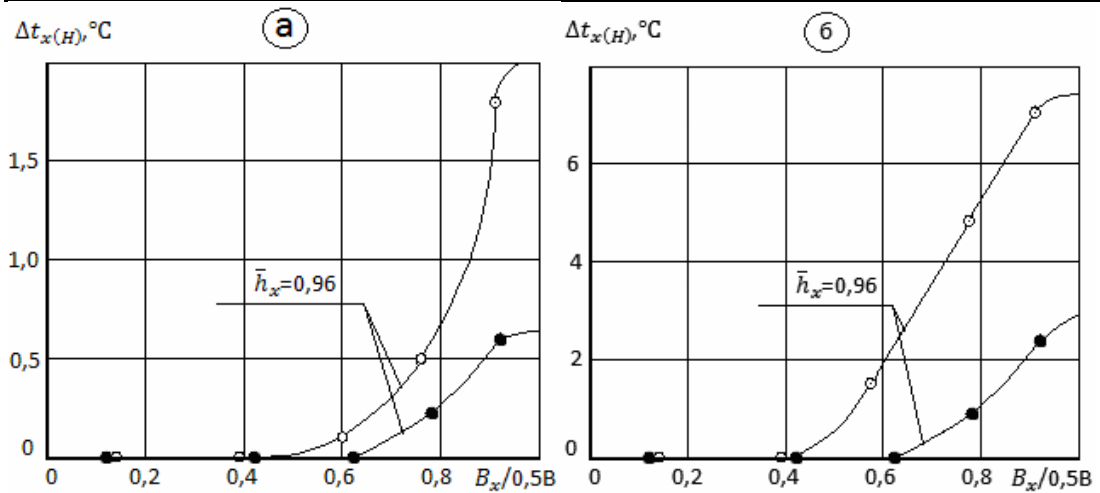


Рис. 3. Изменение температуры воздуха по глубине штабеля грузовых помещений на рефрижераторных судах: в трюме (а); в твиндеке (б) при  $h_x=0,96$ :

—○— традиционный вариант раздачи воздуха и отделки наружных ограждений;  
—●— предлагаемый вариант

В верхнем грузовом помещении судна (в твиндеке) наблюдается более интенсивный характер утепления груза. На отметке  $h_x = 0,96$  отклонение от нормируемого значения температуры составляет: при традиционном решении –  $7^\circ\text{C}$  (штабель утепляется на  $1/3$  ширины); при предлагаемом решении воздухораспределения и отделки наружных ограждений –  $3^\circ\text{C}$  (штабель утепляется на  $1/5$  ширины).

Проведённые экспериментальные исследования показали, что предложенное решение вертикальной системы воздухораспределения и отделки наружных ограждений обеспечивает эффективный отвод как остаточного физического тепла от груза, так и теплопритоков, поступающих в помещение через его наружные ограждения.

Предлагаемый вариант воздушного охлаждения практически позволяет исключить утепление верхних слоёв продукции и создать в рефрижераторном помещении условия, максимально приближённые к режиму стабильного изотермического хранения.

#### Список литературы

1. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений: моногр. / В.Н. Бодров, М.В. Бодров, Е.Г. Ионычев, М.Н. Кучеренко; под общ. ред. В.И. Бодрова. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2008. – 623 с.
2. Цвиговский, Г.К. Повышение эффективности работы рефрижераторных трюмов с воздушным охлаждением при плотной укладке мороженных продуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.К. Цвиговский. – Одесса. 1982. – 20 с.
3. Баканова, С.В. Воздушное охлаждение в помещениях хранения скоропортящейся продукции: моногр. / С.В. Баканова. – Пенза: ПГУАС, 2012.
4. Отделка Отделка трюма рефрижераторного судна: а. с. 1024349 / С.В. Отливщикова, В.Р. Таурит, Ю.К. Федоров. – 1983.

#### References

1. Microclimate production of agricultural buildings and structures: scientific publication / V.N. Bodrov, M.V. Bodrov, E.G. Ionich, M.N. Kucherenko; under Society. Ed. V.I. Bodrov. – N. Novgorod: NNGASU, 2008. – 623 p.
2. Tsvigovsky, G.K. Improving the efficiency of refrigerated holds air-cooled with a dense packing of frozen products: Author. On soisk. uch. Art. PhD / G.K. Tsvigovsky. — Odessa, 1982. – 20 p.
3. Bakanova, S.V. Air cooling in indoor storage of perishable goods: scientific publication / S.V. Bakanova. – Penza: PGUAS, 2012.
4. Otlivschikova, S.V. Finish hold reefer vessel: Copyright certificate number 1024349 / S.V. Otlivschikova, V.R. Taurit, J.K. Fedorov. – 1983.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 72.04-72.036(574)

*Казахская головная архитектурно-строительная академия*

Республика Казахстан, 050043,  
г. Алматы, ул. Рыскулбекова, д.28  
тел.: (727) 309-62-41; факс: (727) 309-61-53

**Приемц Оксана Николаевна,**  
ассистент профессора  
E-mail: Priemets-Oksana@mail.ru

*Kazakh Leading academy of Architecture and Civil Engineering*

Republic of Kazakhstan, 050043,  
Almaty, 28, Riskylbekova,  
tel.: (727) 309-62-41; fax: (727) 309-61-53

**Priemets Oksana Nikolaevna,**  
Assistant Professor  
E-mail: Priemets-Oksana@mail.ru

## РАЗВИТИЕ АРХИТЕКТУРНОГО ОРНАМЕНТА В ЗОДЧЕСТВЕ АЛМАТЫ КОНЦА XIX – НАЧАЛА XX ВЕКА

О.Н. Приемц

Период конца XIX – начала XX века является важнейшим в истории развития архитектурного орнамента в Алматы. Именно в этот период зародились основные направления применения орнаментальных композиций в уникальной и массовой городской застройке.

*Ключевые слова: архитектурный орнамент, орнаментальная композиция, декоративное панно.*

## DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL ORNAMENT IN ARCHITECTURE OF ALMATY LATE IN XIX – EARLY XX CENTURY

O.N. Priemets

The period of the late XIX – early XX century is the most important in the development of architectural ornament in Almaty. It was during this period when main directions of ornamental compositions use originated in unique and massive urban development.

*Keywords: architectural ornament, ornamental composition, decorative panel.*

Появившееся в середине XIX века поселение, ставшее впоследствии городом Алматы, после разрушительного землетрясения 1889 г. интенсивно восстанавливается и застраивается. Особенности культурно-исторических процессов в полиэтнической среде определяют формирование становящегося все более устойчивым интереса к региональным архитектурно-художественным формам, отдельные элементы которых интерпретируются с различных позиций в городской застройке. И особое место здесь принадлежит казахскому орнаменту как наиболее узнаваемому символу сохранения историко-культурной преемственности в формообразовании. Первоначально в сочетании с повсеместно распространенными геометрическими и растительными узорами региональный орнамент в единичных примерах встречается в виде небольших вставок в структуре кованных, резных и лепных элементов. Применяемые орнаментальные композиции характеризуются тесным переплетением мотивов различного происхождения. Начало массового применения региональных орнаментальных композиций на основе

целенаправленного поиска «национального стиля» приходится уже на следующий период развития алматинской архитектуры.

Небольшое количество сохранившихся построек этого периода и их достаточно компактная локализация определили их весьма глубокую изученность. Показательны в этом отношении исследования Т. Басенова, Б. Глаудинова, М. Мендикулова, К. Самойлова и др. [1, 2]. В аспекте данного исследования интерес представляет уточнение особенностей орнаментирования деталей, которые не были рассмотрены ранее. Характерными примерами применения отдельных орнаментных композиций являются: Туркестанский Кафедральный собор на ул. Пушкина (1907 г., арх. К. Борисоглебский, С. Тропаревский, А. Зенков), в котором небольшие картуши применены в развитых наличниках окон; торговый дом «Исхак Габдулвалиев и сыновья» на пр. Жибек жолы (1911 г., арх. А. Зенков), в котором использованы несколько типов фигурных шпилей и многоярусных карнизов с мелкодетальными причелинами; дом Головизина на ул. Курмангазы (1905–1908 гг.), в котором развитые растительные узоры использованы для акцентирования композиционных доминант; дом Татарина на ул. Богенбай батыра (1890 г., арх. П. Гурдэ) с развитыми резными карнизами.

Редкий сохранившийся пример **орнаментированных колонн и пилястр** – дом Шахворостова на ул. Фурманова. Развитые угловые пилястры имеют сечение в виде трехчетвертного квадрата с полукругами по внешним сторонам, который расчленен мелкими редко расположенными канелюрами. Неразвитая капитель отделена от ствола сложнопрофильным поясом. В верхней части аналогичный пояс помещен между рядом крупных бусин и дентикул. Зона собственно капители отмечена лепным картушем с овальным медальоном в центре. Под медальоном в Т-образной композиции помещены многочисленные скомпонованные в букеты лепестки, имеющие развитые спиральные завитки.

Примеры **орнаментированных карнизов и поясов**: торговый дом «Габдулвалиев и сыновья», пр. Жибек жолы; дом Шахворостова, ул. Фурманова; дом Сейдалиных, ул. Панфилова; дом Габдулвалиева, ул. Тулебаева; дом Татарина, ул. Богенбай батыра; дом Головизина, ул. Курмангазы; Мужское училище, ул. Гоголя; Никольский собор, ул. Кабанбай батыра; жилой дом, ул. Гоголя; дом Офицерского собрания, ул. Зенкова. Решенный в стилистике модерна торговый дом «Габдулвалиев и сыновья» на пр. Жибек жолы имеет развитые резные карнизы и многоярусное венчание в виде коробового чешуйчатого свода. Композиционные оси фиксированы многочисленными шпильями. Рисунок первого яруса карнизов свода и шпилей представляет собой чередование полудисков с круглыми отверстиями посередине и парных вытянутых треугольных зубцов. Нижняя часть шпилей выполнена в виде четырех сомкнутых вокруг ствола развитых S-образных завитков с лепестками, образованными широкой полосой с осевой перфорацией мелкими круглыми отверстиями. В структуре карниза основного ската кровли нижняя причелина представляет собой аналогичное карнизам свода и шпилей сочетание полудисков с парными треугольными зубцами. Однако в отличие от ранее рассмотренных причелин, здесь на дисках выполнено четыре круглых отверстия, а на зубцах пять. Каждое периметральное отверстие соединено пропилом с центральным. Развитый фигурный фронтон дома Шахворостова по ул. Фурманова имеет сплошное высокорельефное орнаментальное покрытие растительной тематики. В центральной его части помещен крупный медальон с развитым крестоцветом. Специфика претендующего на реалистичность узора заключается в его большой плотности, практически исключающей наличие фона как значимой части изображения: его роль в определенной степени выполняют тени в углублениях. В отличие от фронтона орнаменты, помещенные на многоярусные карнизы, имеют более низкий рельеф, меньшую реалистичность изображения и наличие фона как значимого элемента узора. Так, непосредственно под скатом на карнизе чередуются пальметты с сомкнутыми и распутившимися листьями, а на архитраве изображения бутонов и крестоцветов помещены в отдельные квадратные или прямоугольные высокорельефные филенки, формирующие своеобразный пояс крупных дентикул.

Трехчастный развитый карниз дома Сейдаллиных по ул. Панфилова сформирован резными лепестками трех величин. Причем больший и средний по величинам ряды наложены друг на друга вплотную, а меньший расположен на некотором удалении за счет крупного уступа. В каждом типе лепестков выполнены своей формы и размеров прорезы. Сложный пятиступчатый карниз применен в доме Габдулвалиева по ул. Тулебаева. Нижний пояс представляет собой пересекающиеся горизонтально расположенные S-образные завитки с лепестками. Средний трехступчатый ярус акцентирован лентой коротких спиральных завитков с отогнутыми лепестками и бутонами на стыках. На этих ярусах прослеживается равнозначность узора и фона. Горизонтальная и вертикальная грани верхнего уступа полностью покрыты реалистичным растительным узором из многочисленных изогнутых стеблей с раздвоенными листьями и розетками. Подкатная двухчастная причелина развитого карниза дома Татаринова на ул. Богенбай батыра состоит из наложенных друг на друга прорезных элементов, основной узор которых образуют упрощенные горизонтально и вертикально помещенные S-образные завитки с изменяющейся шириной. В зоне примыкания к несущей конструкции дополнительным узором является бусообразная полоса из чередующихся крупных и мелких колец. Надкарнизный участок стены аттика с люкарной дома Головизина по ул. Курмангазы акцентирован лепной композицией из нескольких сложно извивающихся реалистично изображенных стеблей с многочисленными длинными и короткими листьями.

Три типа резных причелин использовано в карнизах Мужского училища по ул. Гоголя. Большая представляет собой вытянутые двойные лепестки с фигурными прорезами; наложенная на нее средняя – фигурную мелкую аркатуру; меньшая – чередующиеся кольцами с фигурным внешним обводом спаренные упрощенные спиральные завитки с бутонами на стыках. В различных сочетаниях эти причелины использованы в основном и междуэтажном карнизах, а также в подоконных поясах. Сложный карниз с шестью ярусами расположенных мелкодетальных причелин имеет увенчанное сводом крыльцо жилого дома по ул. Гоголя. Узор сочетает разнофигурные аркатуры, крупные и мелкие дентикулы, а также бусы. Карнизы и кровельные ограды дома Офицерского собрания по ул. Зенкова образованы расположенными в несколько ярусов рядами колец, чередующихся спаренными через бутоны с лепестками спиральными завитками, а также крупными листьями с прорезями в виде одиночных или сомкнутых спиральных завитков. В отличие от деревянных резных причелин ранее рассмотренных карнизов, аналогичные элементы Никольского собора по ул. Кабанбай батыра выполнены из тонколистового металла. Одноярусная широкая накладка имеет ряд ромбических прорезей в верхней части, крестовых (пересекающиеся вытянутые восьмерки) – в средней, образующих бахрому соединенных спиралевидных завитков с рядом круглых отверстий над ними.

Аналогичным образом решены в этом здании и **орнаментированные наличники и обрамления**, однако их узор значительно более сложен. Так, решетчатые архивольты рядовых полукруглых окон представляют собой дуговые связки S-образных завитков со сложными спирально закрученными ответвлениями и многочисленными лепестками. В расположенных на композиционных осях фасадов более крупных полукруглых окон в структуру узора архивольта добавлены тонкие кольца, внутри которых помещены силуэты различных райских птиц. Дополняет композицию некоторых из этих архивольтов решетчатый кокошник, узор которого повторяет узор архивольта, только в чуть меньшем размере. Боковины наличников в Кафедральном соборе по ул. Айтеке би выполнены в виде пилястр с каннелированными стволами. Плоская капитель акцентирована высокорельефным двухплоскостным W-образным узором из крупных стеблей с мелкими лепестками и бутонами. Шейка выполнена в виде двойной планки, а абак – одиночной широкой.

Значительное распространение в рассматриваемый период получили картуши в тимпанах фронтонов наличников. Так, например, в жилом доме по ул. Толе би это уполовиненный солярный знак; в жилых домах по ул. Казыбек би и ул. Барибаева – соединенные через направленный вниз бутон с лепестками горизонтально располо-

женные S-образные завитки; в жилых домах по ул. Жансугурова и ул. Айтеке би – аналогичная композиция с бутоном, направленным вверх, причем в последнем случае стыковая часть включает многочисленные лепестки; в жилом доме по ул. Казыбек би применены двойные волнообразные стебли с прижатыми лепестками; в Торговом доме «Габдулвалиев и сыновья» по пр. Жибек жолы ось фронтона зафиксирована крупной балясиной, к которой подведены спиральные завитки с большими расчлененными в нескольких местах листьями. Показательно, что узоры выполнены как в виде плоских накладок (дом Сейдаллиных на ул. Панфилова, жилые дома на ул. Толе би, ул. Казыбек би и ул. Айтеке би), так и в виде высокорельефных сложнопрофильных накладок (жилые дома на ул. Жансугурова и ул. Барибаева, Торговый дом «Габдулвалиев и сыновья»). Небольшие картуши в виде S-образно изгибающихся стеблей с многочисленными листьями и бутонами помещены с обеих сторон развитых замков арок в доме Головизина на ул. Курмангазы. Узор формируют натуралистично выполненные лепные элементы. Развитые многоэлементные наличники двух видов обрамляют окна в доме Шахворостова по ул. Фурманова. Широкие окна обрамлены развитой сложнопрофильной филенкой, внутри которой по вертикали расположена гирлянда из вытянутых листьев и гроздьев плодов, а по горизонтали – гирлянда из стеблей с отогнутыми листьями. Углы филенки акцентированы квадратными розетками с крестоцветами. В середине перемычки помещен распутившийся восьмилепестковый бутон. Над перемычкой помещен крупный высокорельефный картуш. Он сформирован на основе осевой композиции из наклонно расположенных S-образных и спиральных завитков, решенных в виде волн с многочисленными лепестками, бутонам, цветами и плодами, а также нескольких цветочных гирлянд. Узкие окна имеют простую филенку. Перемычка выполнена в виде сложнофигурного фронтона, увенчанного вазой с цветами. От нее под наклоном расходятся S-образные завитки с многочисленными лепестками. Собственно фронтон представляет собой трапециевидную в сечении крупную прямоугольную филенку с трапециевидным выступом в середине. В центре филенки помещена большая пальметта. От нее в обе стороны идут разделенные маленькими пальметтами S-образные и спиральные завитки с лепестками и бутонами. В углах как продолжения завитков располагаются крупные цветы. Скомпонованные в узор элементы сочетают реалистичность и условность изображения.

Среди достаточно редких примеров **орнаментированных вставок и панно** показательны: дом Головизина, ул. Курмангазы; дом Сейдаллиных, ул. Панфилова. В обоих случаях это сложнопереплетающиеся стебли с многочисленными лепестками и цветами различной величины. Композиция каждой группы имеет вертикальную ось симметрии. Группы увязаны попарно над дугвыми фронтонами (дом Головизина) или в обрамлении арочного окна мансарды (дом Сейдаллиных).

Наличие повсеместно применявшихся на протяжении периода **орнаментированных малых архитектурных форм** в процессе данного исследования выявлено не было: в современной городской застройке таких элементов не сохранилось, отсутствует также и упоминание о наличии этих элементов в ранее проведенных историко-архитектурных исследованиях различных авторов.

#### Список литературы

1. Памятники истории и культуры Алматы: каталог документов / сост. Л.А.Матвеева; Управление архивами и документацией г. Алматы, ЦГА г. Алматы. – Алматы: Онер, 2003. – 208 с.
2. Самойлов, К.И. Архитектура Казахстана XX века (Развитие архитектурно-художественных форм) / К.И. Самойлов. – М.–Алматы: М-Ари дизайн, 2004. – 940 с.

#### References

1. Historical and cultural monuments of Almaty. Catalogue of documents / Comp. L.A.Matveeva; Archives and Records Administration, Almaty, Almaty CSA. – Almaty: Oner, 2003. – 208 p.
2. Samoilov, K.I. Kazakhstan architecture of the twentieth century (Development Architecture and art forms ) / K.I. Samoilov. – M.–Almaty: M- Ari design, 2004. – 940 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

**Логанина Валентина Ивановна,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Управление качеством и  
технологии строительного производства»  
E-mail: loganin@mai.ru

**Учаева Татьяна Владимировна,**  
аспирант кафедры «Экономика,  
организация и управление производством»

**Бахтеева Алсу Алиевна,**  
студент технологического факультета

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Loganina Valentina Ivanovna,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Quality management and  
construction technologies»  
E-mail: loganin@mai.ru

**Uchaeva Tatiana Vladimirovna,**  
Postgraduate of the department «Economics,  
Organization and Management»

**Bakhteeva Alsou Aliевна,**  
student of the Faculty of Technology

### ВЫБОР ПОСТАВЩИКОВ СЫРЬЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ \*

В.И. Логанина, Т.В. Учаева, А.А. Бахтеева

Приведены сведения о влиянии вида поставщика цемента на состояние технологического процесса производства бетонных блоков. Показано изменение стабильности и воспроизводимости технологического процесса производства бетона в зависимости от вида поставщика.

*Ключевые слова: поставщик, индексы воспроизводимости, стабильность процесса, уровень брака.*

### SELECTION OF RAW MATERIALS SUPPLIERS DEPENDING ON PRODUCTION CONDITION

V.I. Loganina, T.V. Uchaeva, A.A. Bakhteeva

Information about the effect of cement supplier type on production process of concrete blocks is given. Variation of stability and reproducibility of the manufacturing process of concrete, depending on the supplier is shown.

*Keywords: supplier, indexes reproducibility, process stability, the level of marriage.*

Потенциал конкурентоспособности предприятий промышленности строительных материалов определяется в числе других факторов выбором поставок материальных ресурсов. Существующие в настоящее время модели оценки поставщиков основываются на следующих критериях: качество сырья; цена; надежность поставки; условия платежа; возможность внеплановых поставок; удаленность поставщика от предприятия; объемы поставок и т.д. [1, 2, 3, 4].

---

\* Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части.

На наш взгляд, при выборе поставщика необходимо учитывать состояние технологического процесса производства, а именно: его стабильность и воспроизводимость [5, 6]. Актуальность этой проблемы обусловлена тем, что показатели качества сырья, даже если они находятся в пределах поля допуска в соответствии с действующей нормативной документацией, оказывают значительное влияние на показатели качества будущей продукции и состояние технологического процесса ее производства.

В данной работе представлены результаты оценки состояния технологического процесса (стабильности и воспроизводимости) производства бетонных изделий в зависимости от вида поставщиков цемента на примере некоторых предприятий стройиндустрии г. Пензы. Для исключения влияния изношенности оборудования, квалификации персонала были взяты статистические данные за промежуток времени, незначительно отличающийся по продолжительности. В качестве поставщиков цемента взяты следующие предприятия: ОАО «Мордовцемент», ЗАО «Ульяновскцемент», ЗАО «Жигулевские стройматериалы». Стабильность технологического процесса оценивалась по контрольным картам Шухарта, воспроизводимость процесса – по показателям индекса воспроизводимости  $C_p$  и  $C_{pk}$  (ГОСТ Р 51814.3–2001). Для построения контрольных карт и расчета индексов воспроизводимости  $C_p$  и  $C_{pk}$  использовали статистические данные отпускной прочности блоков бетонных для стен подвалов, изготовленных из цемента каждого из поставщиков на предприятии ООО «Строительные материалы», г. Пенза. Марка бетона 100, отпускная прочность составляет 70 % от проектной. Индексы воспроизводимости рассчитывали по формулам:

$$c_p = \frac{ВД - НД}{6\sigma} \quad (1)$$

или

$$c_{pk} = \min \left\{ \frac{ВД - \bar{x}}{3\sigma}; \frac{\bar{x} - НД}{3\sigma} \right\}, \quad (2)$$

где ВД, НД – верхний и нижний допуски на показатель прочности бетона (соответственно 105 кгс/см<sup>2</sup> и 70 кгс/см<sup>2</sup>).

Результаты расчетов приведены на рис.1-3 и в таблице.

Т а б л и ц а

Влияние вида поставщика цемента на уровень дефектности продукции

Наименование поставщика цемента	Состояние технологического процесса производства бетонных блоков	Индексы воспроизводимости	Уровень дефектности, %
ОАО «Мордовцемент»	Процесс производства стабилен, но не воспроизводим	0,86	0,99
ЗАО «Ульяновскцемент»	Процесс производства нестабилен, но воспроизводим	1,0	0,27
ЗАО «Жигулевские стройматериалы»	Процесс производства нестабилен и не воспроизводим	0,69	3,8

Анализ данных, приведенных на рис.1-3 и в таблице, свидетельствует о существенном влиянии вида поставщика на состояние процесса производства. На  $\bar{x}$ -карте некоторые точки выходят за границы регулирования (рис.2, 3). Это свидетельствует о нестабильности процесса производства бетонных блоков. Так как  $c_{pk} < 1$  (поставщик ОАО «Мордовцемент», ЗАО «Жигулевские стройматериалы»), то это означает, что процесс невоспроизводим. Такое различие в состоянии технологического процесса обусловлено, на наш взгляд, вариабельностью показателей качества сырья, что, безусловно, отражается в вариациях показателей прочности бетона [7, 8].



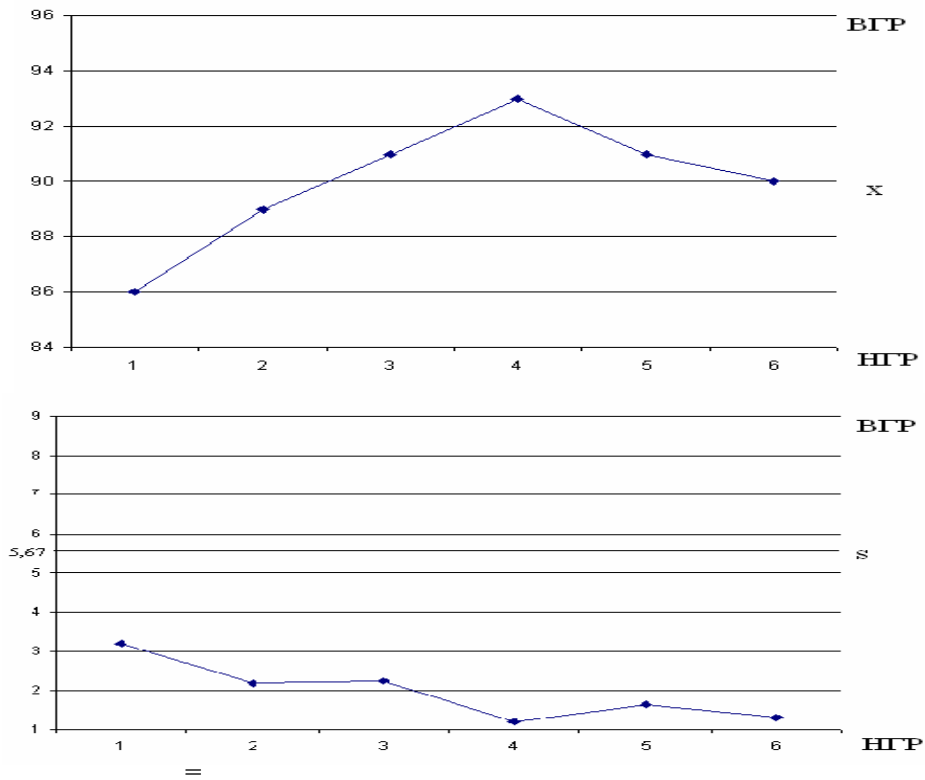


Рис. 1.  $x - s$ -карта (поставщик цемента ОАО «Мордовцемент»)

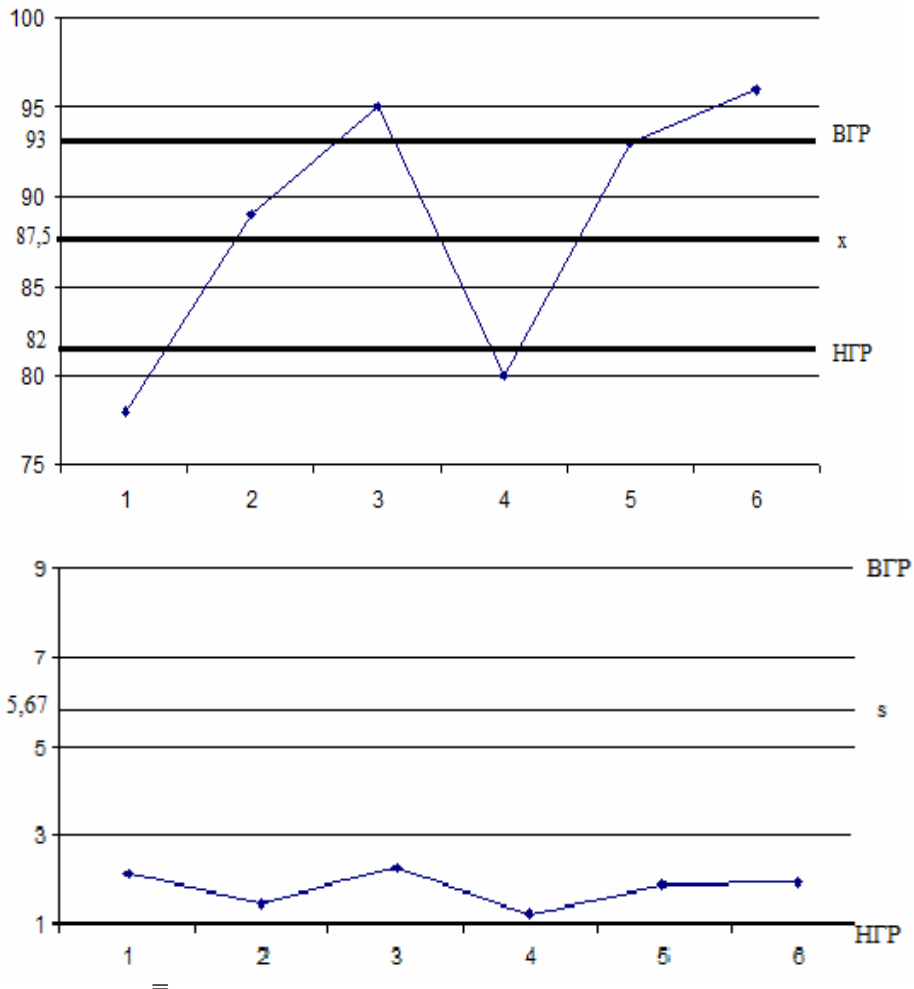


Рис. 2  $x - s$ -карта (поставщик цемента ЗАО «Ульяновскцемент»)

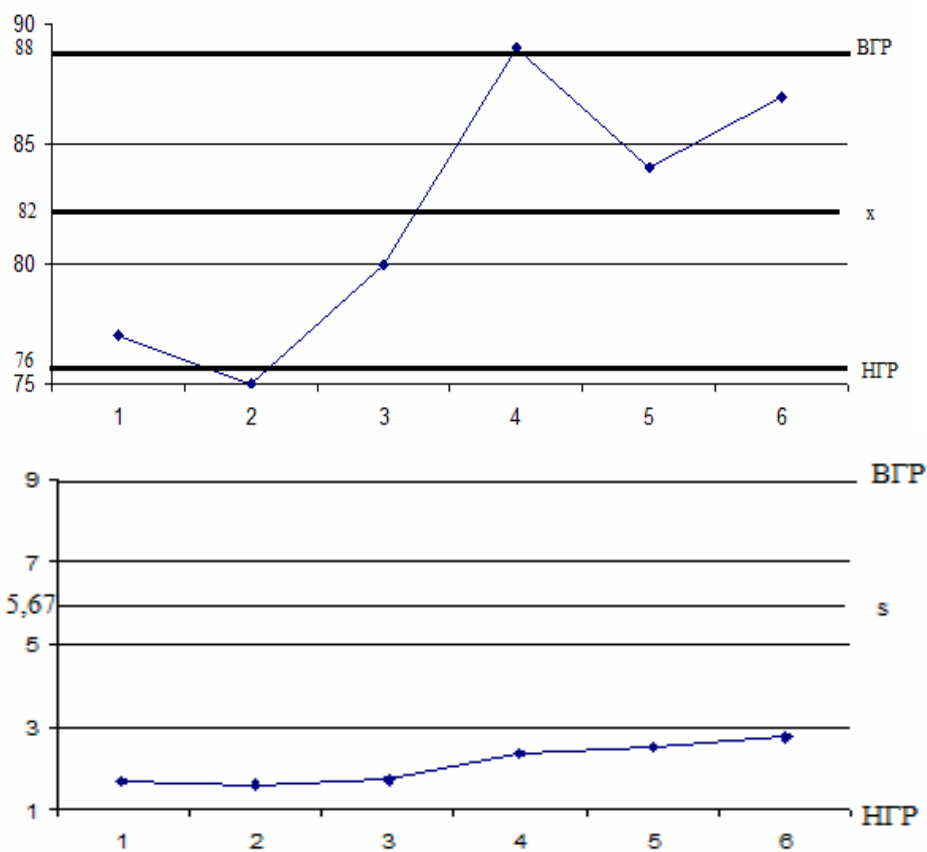


Рис.3.  $x - s$ -карта для ЗАО «Жигулевские стройматериалы»

В случае применения сырья поставщиков ЗАО «Ульяновскцемент», ЗАО «Жигулевские стройматериалы» требуется безотлагательное вмешательство в процесс со стороны линейного персонала с целью обнаружения специальной причины вариативности и ее скорейшего устранения.

Следует иметь в виду, что реальный уровень дефектности продукции будет значительно выше указанного в таблице, т.к. качество продукции оценивается не одним значением, а несколькими. Вероятность получения реального уровня качества будет установлена соотношением

$$P = (1 - q_1)(1 - q_2) \dots (1 - q_n), \quad (3)$$

где  $n$  – число показателей, определяющих качество продукции.

Таким образом, при выборе поставщиков следует учитывать состояние технологического процесса производства сырья, т.е. вариативность показателей качества поставляемого сырья, что позволит повысить качество будущей продукции.

#### Список литературы

1. Андрейчиков, А.В. Анализ, синтез принятия решений: учебник для студентов высших учебных заведений / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 200 с.
2. Майкл Р., Линдерс. Управление снабжением и запасами / Майкл Р. Линдерс, Харольд Е. Фирон. – СПб: ООО «Виктория плюс», 2002. – 768 с.
3. Еремина, Е.А. Нечеткая модель выбора поставщика / Е. А. Еремина // Молодой ученый. – 2011. – №11. Т.1. – С. 120–122.
4. Новиков, М.В. Маркетингово-экономическая модель аттестации поставщиков / М.В. Новиков // Корпоративный менеджмент. – Режим доступа: [http://www.cfin.ru/management/manufact/allest\\_sup.shtml](http://www.cfin.ru/management/manufact/allest_sup.shtml)

5. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И.Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3-4. – С. 42–45.

6. Логанина, В.И. К вопросу о достоверности контроля при производстве бетона / В.И. Логанина, А.Н. Круглова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 4. – С. 24–26.

7. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.

8. Логанина, В.И. К вопросу о системе контроля качества на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 1. – С. 31–33.

#### References

1. Andreychikov, A.V. Analysis, synthesis decisions. Textbook for university students / A.V. Andreychikov, O.N. Andreichikova. – M.: Finance and Statistics, 2000. – 200 p.

2. Michael R., Leenders, Supply management and inventory / Michael R. Leenders, Harold E. Fearon. – St. Petersburg: LLC «Victoria plus», 2002. – 768 p.

3. Eremina, E.A. Fuzzy model of supplier selection / E.A. Eremina // Young scientist. – 2011. – № 11. V.1. – P. 120–122.

4. Novikov, M.V. Marketing and economic model certification providers / M.V. Novikov // Corporate Management. – Mode of access [http // www.cfin.ru / management / manufact / allest\\_sup.shtml](http://www.cfin.ru/management/manufact/allest_sup.shtml)

5. Loganina, V.I. On the regulation of technological processes of concrete / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Building. – 2009. – № 3-4. – P. 42–45.

6. Loganina, V.I. On the reliability of quality control in the production of concrete / Loganina V.I Kruglov A.N // Bulletin of Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2011. – № 4. – P. 24–26.

7. Loganina, V.I. Organization of acceptance sampling quality construction products and / V.I. Loganina // Building Materials. – 2008. – № 8. – P. 98–99.

8. Loganina, V.I. On the question of the quality control system for construction enterprises / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // Regional architecture and engineering. – 2010. – № 1. – P. 31–33.

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

**Горелов Александр Михайлович**,  
аспирант кафедры «Организация и  
безопасность движения»  
E-mail: dezel89@mail.ru

**Орлов Никита Андреевич**,  
аспирант кафедры «Организация и  
безопасность движения»  
E-mail: obd@pguas.ru

**Власов Алексей Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Организация и безопасность  
движения»  
E-mail: vlasov\_a71@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

**Gorelov Aleksandr Mikhaylovich**,  
Postgraduate of the department  
«Organization of Safety Road Traffic»  
E-mail: dezel89@mail.ru

**Orlov Nikita Andreyevich**,  
Postgraduate of the department «Organization  
of Safety Road Traffic»  
E-mail: obd@pguas.ru

**Vlasov Aleksey Aleksandrovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Organization of Safety Road  
Traffic»  
E-mail: vlasov\_a71@mail.ru

## КАЛИБРОВКА МИКРОСКОПИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ ГОРОДОВ

А.М. Горелов, Н.А. Орлов, А.А. Власов

Рассмотрена процедура калибровки микроскопических имитационных моделей транспортных сетей с оценкой адекватности по критерию Колмогорова – Смирнова.

*Ключевые слова:* транспортные системы городов, имитационные модели, калибровка.

## CALIBRATION OF MICROSCOPIC MODELS OF TRANSPORT STREAM IN PROBLEMS OF CITIES TRANSPORT PLANNING

A.M. Gorelov, N.A. Orlov, A.A. Vlasov

The procedure of calibration microscopic imitating models of transport networks with an adequacy estimation by Kolmogorov – Smirnov's criterion is considered.

*Keywords:* transport systems of cities, microscopic models, calibration.

В последние десятилетия в Российской Федерации наблюдается интенсивный рост парка автотранспортных средств (с 132 авт./1000 жит. в 2000 г. до 257 авт./1000 жит. в 2013 г.), что диктует необходимость использования имитационных моделей транспортных сетей при решении задач планирования реконструкции улично-дорожной сети, организации и регулирования дорожным движением. В процессе разработки модели возникают ошибки следующего рода [1]:

- ошибки спецификации (вызваны несовершенством математической модели движения транспортных средств);
- ошибки детализации (вызваны качеством представления транспортной сети);
- ошибки входных данных (связаны со сбором, вводом или редактированием натуральных данных).

В связи с неизбежностью возникновения ошибок при построении имитационных моделей встает вопрос оценки их адекватности и необходимости выполнения калибровки. Как правило, оценка адекватности транспортных моделей производится по следующим критериям [2]:

- средняя абсолютная ошибка ( $MAE$ ) – количественная мера, оценки близости моделируемых  $x_i^{sim}$  и наблюдаемых  $x_i^{obs}$  значений

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i^{sim} - x_i^{obs}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|;$$

– нормализованная ошибка среднего квадратичного (*RMSNE*)

$$RMSNE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i^{sim} - x_i^{obs}}{x_i^{obs}} \right)^2};$$

– абсолютный процент ошибки (*MAPE*)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i^{sim} - x_i^{obs}}{x_i^{obs}} \right|.$$

Как видим, оценка адекватности транспортных моделей производится по средним значениям наблюдаемых параметров. Подобный подход оправдан применительно к макроскопическим моделям (описывающим состояние транспортного потока средними значениями скорости, интенсивности и плотности движения) и недопустим применительно к микроскопическим моделям (определяющим состояние транспортного потока через скорости отдельных автомобилей).

На работу городской транспортной сети в значительной степени оказывает влияние не только средние значения скоростей и интенсивностей движения, но и характер их вариаций. Например, модели задержки транспортных средств на регулируемых пересечениях включают не только среднее значение интенсивности прибытия транспортных средств, но и ее дисперсию. В связи с этим для микроскопических моделей актуальным является оценка соответствия наблюдаемого в модели распределения калибруемого параметра его распределению в реальном транспортном потоке. Адекватность модели в этом случае можно оценивать при помощи критериев согласия  $\chi^2$  Пирсона (*хи-квадрат*) или Колмогорова – Смирнова. Последний критерий более предпочтителен, так как может быть применен для выборок, объем которых меньше, чем минимально допустимый для корректного использования критерия  $\chi^2$ .

Рассмотрим процедуру калибровки скоростей движения транспортных средств на примере городской транспортной сети и автомобильной дороги регионального значения. В качестве среды разработки модели использовалась программа микроскопического моделирования SUMO (Simulation of Urban Mobility) [3], обеспечивающая простоту реализации собственных алгоритмов управления транспортными потоками и оценки их эффективности.

Процедура калибровки модели носит итерационный характер и включает:

- сбор натуральных данных о параметрах транспортной сети, проведение выборочных наблюдений за состоянием транспортного потока;
- установку начальных оценок параметров модели при использовании доступной информации относительно геометрических и функциональных особенностей транспортных средств и транспортной сети;
- моделирование транспортного потока и извлечение информации о состоянии транспортной сети в контрольных сечениях;
- сравнение моделируемого и полученного в результате наблюдений состояний транспортного потока;
- если различия являются значимыми, то необходима модификация параметров модели с повторением процедуры калибровки;
- при незначимых различиях процесс калибровки заканчивается.

В общем случае выбор переменных, используемых для калибровки имитационной модели, во многом зависит от поставленной задачи моделирования и возможности проведения измерений в реальном транспортном потоке. Применительно к микроскопическим имитационным моделям калибровке подлежит распределение скоростей

в транспортном потоке при фиксированной интенсивности движения (наблюдаемой в реальных условиях движения).

Выбор управляемых переменных, настройка которых обеспечит требуемое качество модели, зависит от специфики конкретной математической модели движения, используемой в программной среде. В SUMO применяется модифицированная дискретная по времени и непрерывная в пространстве модель движения Краусса [4]. Модель основана на определении интервала между ведомым транспортным средством и лидером, необходимым для безопасной остановки:

$$v_{safe}(t) = -\tau \cdot b + \sqrt{(\tau \cdot b)^2 + v_{leader}(t-1)^2 + 2 \cdot b \cdot g_{leader}(t-1)},$$

где  $v_{safe}(t)$  – безопасная скорость в момент времени  $t$ , м/с;  $\tau$  – время реакции водителя ведомого автомобиля, с;  $b$  – максимальное замедление, м/с<sup>2</sup>;  $v_{leader}(t)$  – скорость лидера во время  $t$ , м/с;  $g_{leader}(t)$  – дистанция между передней частью ведомого автомобиля и задним бампером лидера во время  $t$ , м.

При ограничениях на значения желаемой скорости:

$$v_{des}(t) = \min \{v_{safe}(t), v(t-1) + a, v_{max}\},$$

где  $v_{des}(t)$  – желаемая скорость, м/с;  $v(t)$  – текущая скорость, м/с;  $a$  – максимальное ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $v_{max}$  – максимальная скорость, м/с.

Одной из основных особенностей модели Краусса является предположение, что водитель не обязательно должен развивать желаемую скорость, что добавляет важные особенности в поведение водителей. Например, случайное отличие скоростей автомобилей от желаемых приводит к спонтанному образованию заторов и медленному старту автомобилей на светофорах, характерному для реальных условий. Данная особенность поведения водителей учтена путем включения в модель стохастического замедления:

$$v(t) = \max \{0, v_{des}(t) - r \cdot a \cdot \varepsilon\},$$

где  $r$  – случайное число между 0 и 1;  $\varepsilon$  – степень индивидуальности (несовершенства) водителя автомобиля, принимающее значение между 0 и 1;  $v(t)$  – конечная скорость автомобиля в момент времени  $t$ , м/с.

При разработке программы в исходную модель Краусса было внесено два изменения. Первое заключалось в использовании линейной функции ускорения, обеспечивающей его уменьшение с ростом скорости:

$$a(v) = a \left( 1 - \frac{v}{v_{max}} \right).$$

Второе – в уменьшении индивидуальности (несовершенства) водителей при разгоне на малых скоростях:

$$v(t) = \max \{0, v_{dawdle,new}(t)\},$$

где

$$v_{dawdle,new}(t) = \begin{cases} v_{des}(t) \cdot \varepsilon \cdot r & \text{если } v_{des}(t) < a(v_{des}(t)) \\ v_{veh}(t) - \varepsilon \cdot r \cdot a v_{veh}(t) & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

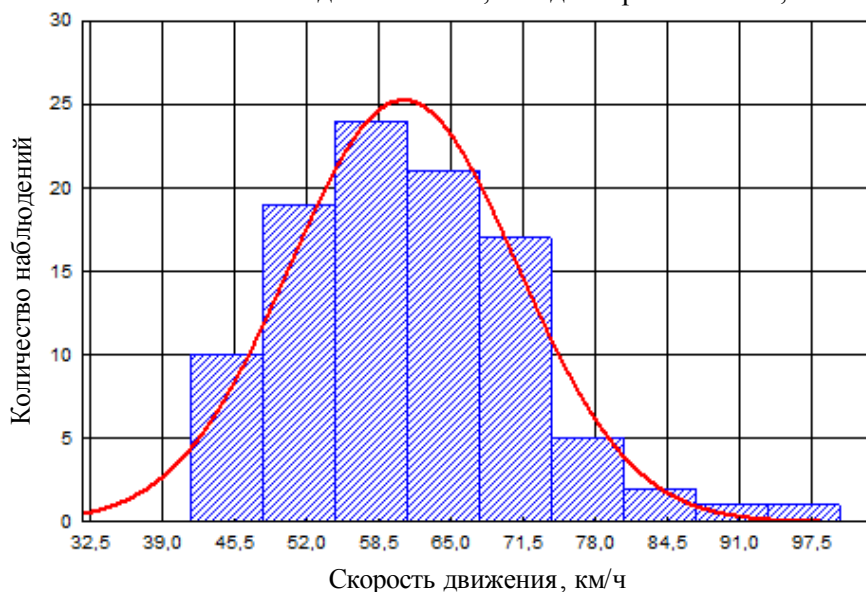
В программе предусмотрена возможность настройки модели движения двумя способами. Первый заключается в задании различных максимальных желаемых скоростей для отдельных потоков на этапе задания транспортного спроса, второй – в модификации максимально желаемой скорости входящих в транспортную сеть автомобилей через интерфейс модуля Traci.

Последний способ является более универсальным и приемлемым для решения разнообразных задач моделирования. Модуль Tgaci позволяет устанавливать желаемую скорость движения  $v_{max}$  автомобилей, вновь появляющихся в транспортной сети.

Сбор исходных данных для калибровки микроскопической модели производился путем измерения скоростей движения отдельных автомобилей в условиях городского движения на ул. Окружная (г. Пенза) и на автомобильной дороге Пенза – Тамбов. Измерение скоростей и определение объема выборки производилось в соответствии с известной методикой [5] (см. рисунок). Распределение скоростей движения статистически достоверно может быть описано логнормальным и нормальным законами распределения со следующими параметрами:

– при движении вне населенных пунктов логнормальным законом распределения с параметрами  $m=4,56$  и  $\sigma=0,031$ ;

– при движении транспортных средств в населенном пункте нормальным распределением с математическим ожиданием  $m=60,72$  и дисперсией  $\sigma=105,38$ .



Распределение скоростей движения на ул. Окружная (г. Пенза)

Для регистрации скоростного режима в модели транспортной сети были установлены виртуальные детекторы транспорта. Результаты измерений скоростей движения при моделировании представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Сводная таблица распределения частот скоростей транспортного потока

Номер интервала	Интервалы скоростей, км/ч	Частоты	
		В реальных условиях	При моделировании
1.	40-50	0	1
2.	50-60	0	1
3.	60-70	4	2
4.	70-80	11	11
5.	80-90	19	17
6.	90-100	27	34
7.	100-110	17	21
8.	110-120	12	5
9.	120-130	5	8
10.	130-140	3	0
11.	140-150	2	0

Обозначим  $n_{i_1}^{\text{нак}}$  и  $n_{i_2}^{\text{нак}}$  – накопленные частоты выборок скоростей в реальных условиях и при моделировании, а через  $F_{n_1}(x_i) = n_{i_1}^{\text{нак}}/n_1$  и  $F_{n_2}(x_i) = n_{i_2}^{\text{нак}}/n_2$  – значения их эмпирических функций распределения соответственно. Обработанные результаты расчетов сведены в табл. 2.

Из последнего столбца табл. 2 определим  $\max |F_{n_1}(x_i) - F_{n_2}(x_i)| = 0,09$ .

Значение критерия Колмогорова – Смирнова равно:

$$\lambda' = \sqrt{\frac{100 \cdot 100}{100 + 100}} \cdot 0,09 = 0,636.$$

Т а б л и ц а 2

$x_i$	$n_{i_1}^{\text{нак}}$	$n_{i_2}^{\text{нак}}$	$F_{n_1}(x_i)$	$F_{n_2}(x_i)$	$ F_{n_1}(x_i) - F_{n_2}(x_i) $
40	0	1	0	0,01	0,01
50	0	2	0	0,02	0,02
60	4	4	0,04	0,04	0
70	15	15	0,15	0,15	0
80	34	32	0,34	0,32	0,02
90	61	66	0,61	0,66	0,05
100	78	87	0,78	0,87	<b>0,09</b>
110	90	92	0,9	0,92	0,02
120	95	100	0,95	1	0,05
130	98	100	0,98	1	0,02
140	100	100	1	1	0

Критическое значение критерия для уровня значимости 0,05 равно 1,36 [6]. С учетом, что неравенство  $\lambda' > \lambda_{0,05}$  ложно, принимается гипотеза о согласии распределения скоростей движения в реальных условиях и при моделировании, на основании чего можно сделать вывод об адекватности микроскопической модели движения.

#### Список литературы

1. Якимов, М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: моногр. / М.Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. – 188 с.
2. Jung-Beom Lee, Kaan Ozbay. Calibration of a Macroscopic Traffic Simulation Model Using Enhanced Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Methodology TRANSPORTATION RESEARCH BOARD'S 87TH ANNUAL MEETING, WASHINGTON, D.C., 2008.
3. Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility/ Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker. // International Journal On Advances in Systems and Measurements, – 2012. – 5 (3&4). – P. 128–138.
4. «Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow»/ Stefan Krauß, Peter Wagner, Christian Gawron // Physical Review E, – 1997. – Vol/ 55, number 304. – P. 55–97.
5. Врубель, Ю.А. Исследование в дорожном движении: пособие к лабораторным работам для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения» / Ю.А. Врубель. – Минск: БНТУ, 2007. – 178 с.
6. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов / Н.Ш. Кремер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.



## References

1. Jakimov, M.R. Transport planning: the creation of transport models cities: monogr. / M.R. Jakimov. – M.: Logos, 2013. – 188 p.
2. Jung-Beom Lee, Kaan Ozbay. Calibration of a Macroscopic Traffic Simulation Model Using Enhanced Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Methodology TRANSPORTATION RESEARCH BOARD'S 87TH ANNUAL MEETING, WASHINGTON, D.C., 2008.
3. Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility/ Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker. // International Journal On Advances in Systems and Measurements, – 2012. – 5 (3&4). – P. 128–138.
4. «Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow»/ Stefan Krauß, Peter Wagner, Christian Gawron // Physical Review E. – 1997. – volume 55, number 304. – P. 55–97.
5. Vrubel', Ju.A. Research in road traffic: training Handbook to laboratory works for students of specialty 1-44 01 02 «Organization of road traffic» / Ju.A. Vrubel'. – Minsk: BNTU, 2007. – 178 p.
6. Kremer, N. Sh. Probability theory and mathematical statistics: textbook for universities / N. Sh.. Kremer – 2-e izd., Rev. and add. – M.: JuNITI-DANA, 2004. – 573 p.