

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

**Выходит 4 раза в год**

**Учредитель и издатель**

Пензенский государственный  
университет архитектуры  
и строительства

**Главная редакция:**

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

**Адрес редакции:**

440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,  
ПГУАС  
Тел/факс 8412 929501  
E-mail: regas@pguas.ru  
fmatem@pguas.ru  
www.rais.pguas.ru

Редакторы: М.А. Сухова  
Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка  
Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

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

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

Подписной индекс:  
**36946** в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов  
несут ответственность за достоверность  
приведенных сведений, точность данных  
по цитируемой литературе и за исполь-  
зование в статьях данных, не подлежа-  
щих открытой публикации.  
Редакция может опубликовать статьи  
в порядке обсуждения, не разделяя точку  
зрения автора.

Подписано к печати 15.03.2021.  
Формат 60x84 1/8.  
Уч.-изд.л. 29,0. Тираж 500 экз. Первый завод 100.  
Заказ № 40.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

1(46)/2021

## Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

**Ибрагимов Р.А., Королев Е.В.**  
ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ  
ДИСПЕРГАТОРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ  
МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ОБЗОР)..... 5

**Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю.,  
Сальникова А.С., Казлитина О.В.**  
К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ВЫСОКОПРОЧНЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ  
БЕТОНОВ ..... 20

**Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И.**  
РЕГРЕССИОННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ  
ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ  
И КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ  
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ..... 28

**Макридин Н.И., Максимова И.Н.**  
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АМОРФНОЙ ФАЗЫ  
ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ..... 35

**Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.**  
КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К  
СИСТЕМНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 41

**Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Теплов И.Ю.**  
ПЕНЫ, СОДЕРЖАЩИЕ  
ГИДРОФОБИЗОВАННЫЕ ЧАСТИЦЫ,  
ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ УГЛЕВОДОРОДНОЙ  
ПЛЕНКИ ..... 46

**Логанина В.И., Куимова Е.И., Зайцева М.В.**  
ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ  
ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
СМЕСЕЙ ..... 54

**Грачева Ю.В., Тарасеева Н.И., Иванов Н.М.**  
ДЛИТЕЛЬНАЯ ВОДОСТОЙКОСТЬ  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ  
ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ..... 63

**Логанина В.И., Фролов М.В.**  
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРПРОНИЦАЕМОСТИ  
ФАСАДНЫХ КРАСОК  
НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА  
В НАРУЖНЫХ СТЕНАХ ..... 70

© Авторы публикаций, 2021

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2021

© ПГУАС, 2021

<b>Будьлина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.</b> ОСНОВЫ КАЧЕСТВЕННОЙ И КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ..... 77	<b>Андреев С.Ю., Шенин А.И., Степанов С.В., Князев В.А.</b> ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА НАПОРНОЙ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ВОЗДУХА В САТУРАТОРЕ..... 160
<b>Низина Т.А., Володин В.В., Балыков А.С., Коровкин Д.И.</b> ОЦЕНКА КИНЕТИКИ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ДОБАВКАМИ ТЕРМОАКТИВИРОВАННОЙ ГЛИНЫ И КАРБОНАТНЫХ ПОРОД..... 86	<b>Андреев С.Ю., Ласьков Н.Н., Степанов С.В., Князев В.А.</b> ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛОТАЦИОННОГО УДАЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ТОНКОСЛОЙНОГО ОТСТАИВАНИЯ И УВЕЛИЧЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КРУПНОСТИ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ФЛОТОКОМПЛЕКСОВ ..... 170
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ..... 95	<b>Береговой А.М.</b> ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ И ЭНЕРГОАКТИВНОСТИ МАЛОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ ..... 183
<b>Комаров В.А., Болдырева О.В., Трегуб А.Ю.</b> НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСОЛЬНЫХ ОПОР БАЛОК С ПОДРЕЗКОЙ..... 95	<b>Усачев А. П., Рулев А.В., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Соловьев В.А.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ГРУБОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ, РАЗМЕЩЕННЫХ В ОДНОМ КОРПУСЕ ГАЗОВОЙ ДУХСТУПЕНЧАТОЙ УСТАНОВКИ..... 188
<b>Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.</b> РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ПОПЕРЕЧНИКА ОДНОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ КАРКАСНОГО ТИПА ..... 103	<b>Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Леонтьев В.А., Петрова К.А.</b> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ МЕСТНОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ СВЕЧЕЙ В ЗАЛЕ БОГОСЛУЖЕНИЯ ..... 195
<b>Городнов И.И., Шенин А.И., Монахов В.А.</b> ОБЗОР РАБОТ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ И РАЦИОНАЛЬНОМУ КОНСТРУИРОВАНИЮ КОМПОЗИТНЫХ БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ ..... 109	<b>Королева Т.И., Щербакова В.В., Каледа И.А.</b> ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ ..... 203
<b>Чуманов А.В., Шенин А.И., Монахов В.А.</b> ЛЕНТОЧНАЯ СИСТЕМА ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ КУПОЛОВ ..... 122	АРХИТЕКТУРА..... 211
<b>Селютин Л.Ф.</b> ИСПЫТАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПОКРЫТИЯ..... 130	<b>Каракова Т.В., Данилова А.В.</b> ХУДОЖЕСТВЕННАЯ ПЕРФОРАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ЭМЕРДЖЕНТНОСТИ СИСТЕМЫ ..... 211
<b>Нежданов К.К., Аргюшин Д.В., Пигина А.С.</b> НОВЫЙ СПОСОБ АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ .. 138	
<b>Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Баукова Н.С.</b> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ..... 144	
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ..... 153	
<b>Гришин Б.М., Бикунова М.В., Кошев А.Н., Малютин Т.В.</b> ОЧИСТКА ВОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ИСТОЧНИКА С ПРИМЕНЕНИЕМ СМЕСЕВЫХ КОАГУЛЯНТОВ ..... 153	

**Дерина М.А., Петрянина Л.Н.**  
 КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
 АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ  
 ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГОРОДСКИХ  
 ОБЩЕСТВЕННЫХ МНОГОФУНКЦИО-  
 НАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ ..... 220

**Богомолова И.С., Дудев М.В.**  
 ПОНЯТИЕ ДИЗАЙН-МЫШЛЕНИЯ И ЕГО  
 РОЛЬ В АРХИТЕКТУРНОМ  
 ПРОЕКТИРОВАНИИ.....227

## Contents

BUILDING MATERIALS AND  
 PRODUCTS..... 5

**Ibragimov R.A., Korolev E.V.**  
 APPLICATION OF MAGNETIC DISPERSERS  
 FOR PROCESSING MINERAL  
 COMPONENTS OF BUILDING MATERIALS  
 (REVIEW) ..... 5

**Lesovik V.S., Elistratkin M.Y.,  
 Salnikova A.S., Kazlitina O.V.**  
 ON THE ISSUE OF IMPROVING THE  
 EFFICIENCY OF HIGH-STRENGTH SELF-  
 COMPACTING CONCRETES ..... 20

**Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I.**  
 REGRESSION RELATIONSHIPS BETWEEN  
 PARAMETERS OF STRUCTURE QUALITY  
 AND STRUCTURAL STRENGTH OF  
 CEMENT STONE ..... 28

**Makridin N.I., Maksimova I.N.**  
 STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE  
 AMORPHOUS PHASE OF POROUS  
 AGGREGATES ..... 35

**Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.**  
 CONCEPTUAL APPROACHES TO SYSTEM  
 DESIGN OF COMPOSITE MATERIALS ..... 41

**Vilkova N.G., Mishina S.I., Teplov I.Yu.,  
 Shumkina A.A.**  
 FOAMS CONTAINING HYDROPHOBIZED  
 PARTICLES FOR PURIFICATION OF  
 WATER FROM HYDROCARBON FILM.... 46

**Loganina V.I., Kuimova E.I., Zaitseva M.V.**  
 ASSESSMENT OF RELIABLE CONTROL OF  
 DRY BUILDING MIXTURES  
 PRODUCTION..... 54

**Gracheva Yu. V., Taraseeva N.I.,  
 Ivanov N.M.**  
 LONG-TERM WATER RESISTANCE OF  
 MODIFIED GEOSYNTHETIC BINDERS FOR  
 ROAD CONSTRUCTION ..... 63

**Loganina V.I., Frolov M.V.**  
 EVALUATION OF THE INFLUENCE OF  
 FACADE PAINTS VAPOR PERMEABILITY  
 ON THE CHANGE OF HUMIDITY REGIME  
 IN EXTERNAL WALLS..... 70

**Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.**  
 FUNDAMENTALS OF QUALITATIVE AND  
 QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE  
 QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS OF  
 HIERARCHICAL STRUCTURE .....77

**Nizina T.A., Volodin V.V.,  
 Balykov A.S., Korovkin D.I.**  
 EVALUATION OF KINETICS OF  
 HARDENING OF CEMENT STONE  
 MODIFIED WITH ADDITIVES OF  
 THERMALLY ACTIVATED CLAY AND  
 CARBONATE ROCKS.....86

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS  
 AND CONSTRUCTIONS ..... 95

**Komarov V.A., Boldyreva O.V.,  
 Tregub A.Yu.**  
 STRESS-STRAIN STATE OF CANTILEVER  
 SUPPORTS OF BEAMS WITH TRIMMING...95

**Guchkin I.S., Laskov N.N.**  
 THE DESIGN OF CROSS SECTION  
 STRUCTURES OF ONE STONEY BULDING  
 OF FRAME TYPE ..... 103

**Gorodnov I.I., Shein A.I., Monakhov V.A.**  
 REVIEW OF THE RESEARCH ON OPTIMAL  
 AND RATIONAL DESIGN OF COMPOSITE  
 MATERIALS BEAM SYSTEMS ..... 109

**Chumanov A.V., Shein A.I., Monakhov V.A.**  
 BELT VIBRATION DAMPING SYSTEM FOR  
 CLOSED DOMES.....122

**Selutina L.F.**  
 RESULTS OF STUDIES OF PRESTRESSED  
 REINFORCED CONCRETE 1PG12-2K7  
 COVERING SLABS ..... 130

**Nezdanov K.K., Artyushin D.V., Pigina A.S.**  
 NEW METHOD OF CONCRETE  
 STRUCTURES REINFORCEMENT ..... 138

**Makarova L.V., Tarasov R.V., Baukova N.S.**  
 EFFICIENCY OF LEAN PRODUCTION  
 OF METAL STRUCTURES FOR OIL  
 AND GAS, METALLURGICAL  
 AND PETROCHEMICAL  
 INDUSTRIES ..... 144

ENGINEERING SYSTEMS .....	153	<b>Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Leontiev V.A., Petrova K.A.</b>	THEORETICAL BASIS AND RECOMMENDATIONS FOR THE CREATION OF LOCAL EXHAUST VENTILATION OF CANDLE COMBUSTION PRODUCTS IN A WORSHIP HALL.....	195
<b>Grishin B.M., Bikunova M.V., Koshev A.N., Malytina T.V.</b>				
SURFACE SOURCE WATER PURIFICATION USING MIXED COAGULANTS .....	153			
<b>Andreev S.Yu., Shein A.I., Stepanov S.V., Knyazev V.A.</b>				
THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF PRESSURE FLOTATION WASTEWATER TREATMENT BY INCREASING THE EFFICIENCY OF AIR DISSOLUTION IN SATURATOR .....	160	<b>Koroleva T.I., Shcherbakova V.V., Kaleda I.A.</b>	TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF WATER MANAGEMENT SYSTEMS OF POPULATED PLACES .....	203
<b>Andreev S.Yu., Laskov N.N., Stepanov S.V., Knyazev V.A.</b>				
THEORETICAL ANALYSIS OF THE POSSIBILITY TO INCREASE THE EFFICIENCY OF FLOTATION TO REMOVE PARTICULATE CONTAMINANTS THROUGH THE USE OF TECHNOLOGICAL METHODS OF THIN-LAYER SEDIMENTATION AND INCREASE IN HYDRAULIC SIZE OF RESULTING FOTOCONECTION .....	170		ARCHITECTURE .....	211
<b>Beregovoy A.M.</b>			<b>Karakova T.V., Danilova A.V.</b>	
THERMAL PROTECTION INCREASING AND ENERGY ACTIVITY OF LOW-RISE BUILDINGS .....	183		ARTISTIC PERFORATION AS A TOOL FOR FORM MAKING OF THE ARCHITECTURE OF A PUBLIC BUILDING IN THE CONTEXT OF SYSTEM EMERGENCE .....	211
<b>Usachev A.P., Rulev A.V., Shuraitis A.L., Birukov A.V., Soloviev V.A.</b>			<b>Derina M.A., Petryanina L.N.</b>	
IMPROVEMENT OF PRESSURE DROP CONTROL ON FLAT FILTER ELEMENTS OF COARSE AND FINE CLEANING PLACED IN THE SAME HOUSING OF A GAS TWO-STAGE INSTALLATION .....	188		CONCEPT OF FORMATION OF ARCHITECTURAL AND PLANNING PATTERNS OF URBAN PUBLIC MULTIFUNCTIONAL CENTERS .....	220
			<b>Bogomolova I.S., Duzev M.V.</b>	
			CONCEPT OF DESIGN THINKING AND ITS ROLE IN ARCHITECTURAL DESIGN .....	227

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.542

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, 1

**Ибрагимов Руслан Абdirашитович**,  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: rusmag007@yandex.ru

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

**Королев Евгений Валерьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
академик Российской инженерной академии, проректор  
E-mail: korolev@nocnt.ru

*Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*

Russia, 420043, Kazan, 1, Zelenaya St.

**Ibragimov Ruslan Abdirashitovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
E-mail: rusmag007@yandex.ru

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

Russia, 190005, St. Petersburg, 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St.

**Korolev Evgenij Valerievich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Engineering, Vice-Rector  
E-mail: korolev@nocnt.ru

### ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ДИСПЕРГАТОРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ОБЗОР)

Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев

Представлено современное состояние вопроса применения аппаратов с наружным электромагнитным полем в технологии получения строительных материалов. Обобщены конструктивные решения такого типа аппаратов, даны их классификация и области применения в различных промышленных технологиях. Показана эффективность использования аппаратов вихревого слоя в технологиях широкого спектра композиционных материалов. Представлены эффекты, полученные различными исследователями, и сформулировано, что научно обоснованное применение указанного способа обработки минеральных компонентов строительных материалов должно основываться на совершенствовании методик оценки возникновения и релаксации эффекта механоактивации, установлении и обобщении новых знаний о структурообразовании строительных композиций на активированных компонентах, оптимизации составов и режимов изготовления технико-экономически эффективных строительных материалов.

*Ключевые слова: индукция, электромагнитное поле, вихревой слой, производство, строительные материалы, минеральные компоненты, минеральные вяжущие вещества, аппарат вихревого слоя, механоактивация*

## APPLICATION OF MAGNETIC DISPERSERS FOR PROCESSING MINERAL COMPONENTS OF BUILDING MATERIALS (REVIEW)

R.A. Ibragimov, E.V. Korolev

A current state of the issue of using devices with an external electromagnetic field in the technology of obtaining building materials is presented. The solutions of this type of apparatus are generalized, their classification and application areas in various industrial technologies are given. The efficiency of vortex layer apparatus application in technologies of a wide range of composite materials is shown. The effects obtained by various researchers are presented and it is formulated that the scientifically grounded application of this method of processing mineral components of building materials should be based on improving the methods for assessing the occurrence and relaxation of the effect of mechanical activation, establishing and generalizing new knowledge about the structure formation of building composites on activated components, optimizing compositions and modes of manufacturing techno-economically efficient building materials.

*Keywords: induction, electromagnetic field, vortex layer, production, building materials, mineral components, mineral binders, vortex layer apparatus, mechanical activation*

Процесс измельчения является часто ключевым процессом подготовки минеральных компонентов строительных материалов. Измельчение приводит не только к закономерному увеличению дисперсности, но и протеканию физико-химических процессов преобразования структуры поверхностных слоев обрабатываемого материала. При достаточной интенсивности таких процессов в научно-технической литературе такое измельчение получило наименование «механоактивация». Еще одной важной функцией измельчения является усреднение химического состава минеральных компонентов. Последнее особенно важно при использовании в технологии производства строительного материала вторичных ресурсов (отходов промышленности).

В настоящее время в производстве строительных материалов в области тонкого и сверхтонкого измельчения исходных продуктов применяют мельницы: шаровые [1], вибрационные [2], струйные [3], роторные [4], валковые [5], электромагнитные [6–7].

Исходный продукт измельчается под действием ударных, сдавливающих, растирающих, раскалывающих усилий. При этом данные усилия формируются разнообразными измельчающими телами (шары, стержни, валки, ролики и др.) или размольными органами (роторы, диски, лопасти и др.).

Анализ мельниц различного типа показал, что основным критерием, определяющим конструкцию мельницы и способ измельчения, является механизм передачи энергии обрабатываемому материалу (рис. 1):

а) характеризуется как минимум 2 точками соприкосновения между частицей и сдавливающей средой или между частицами;

б) характеризуется 1 контактом между частицей и средой или между частицами;

в) силы, ослабляющие межмолекулярные связи;

г) измельчение термическим, химическим или электрическим способом.

В зависимости от механизма измельчения различают следующие виды напряжений, возникающих в обрабатываемых частицах (рис. 2).

Анализ научной литературы и патентной информации [10–17] позволяет сделать вывод, что наименьшие затраты при измельчении у тех мельниц, конструкции которых обеспечивают движение мелющих тел электромагнитным полем. В табл. 1 представлены характеристики различных мельниц, анализ которых демонстрирует преимущества указанного типа мельниц. В табл. 1 представителем мельниц, в которых движение мелющих тел обеспечивается электромагнитным полем, является аппарат вихревого слоя.

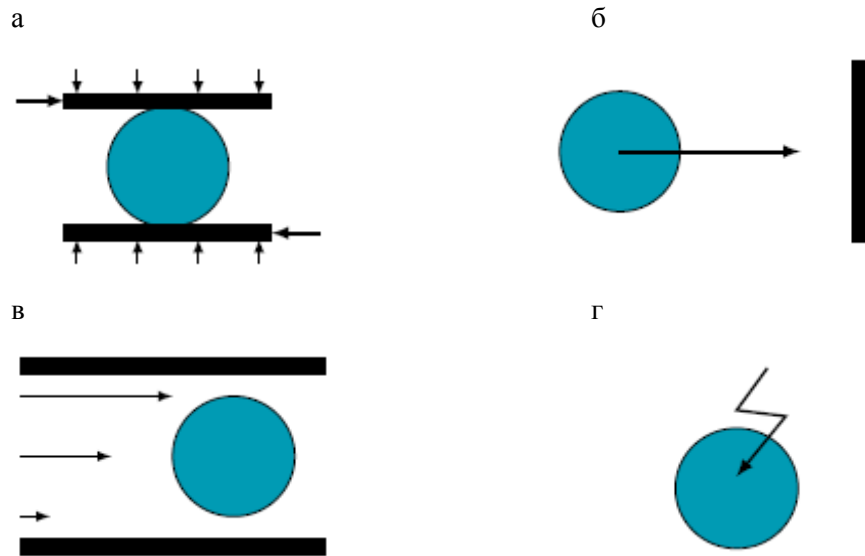


Рис. 1. Типы нагрузок на обрабатываемую частицу при измельчении [8]:  
 а – раздавливание; б – удар; в – напряжения от внешней среды;  
 г – напряжения от немеханического воздействия

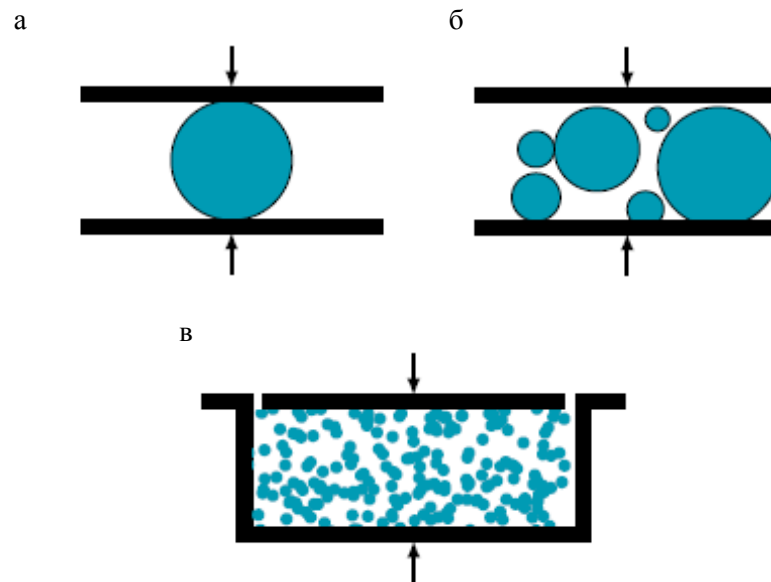


Рис. 2. Виды напряжений в обрабатываемых частицах [9]:  
 а – напряжение в одной частице; б – напряжение в группе частиц;  
 в – напряжение в объеме обрабатываемого материала

Т а б л и ц а 1

Сравнительные характеристики различных типов мельниц

Вид аппарата	Скорость измельчающего тела, $v$ , м/с	Время измельчения, $t_d$ , с	Сила удара, $F$ , Н	Импульс силы, $F_p$ , Н·с	Количество подведенной энергии, $Y$ , Дж/(кг·с)
Шаровая мельница	0,1	7200	0,128	$7,2 \cdot 10^{-2}$	12,4
Планетарная мельница	6,68	2700	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$7,37 \cdot 10^{-2}$	20,0
Виброистиратель	8,78	600	35,12	$2,11 \cdot 10^4$	29,0
Аппарат вихревого слоя	8,41	300	168,1	$5,04 \cdot 10^4$	60,0

Согласно [18–20], конструкции мельниц, реализующих принцип электромагнитного привода мелющих тел, подразделяются на:

- 1) с электромагнитным полем переменного тока;
- 2) со стационарным электромагнитным полем постоянного тока;
- 3) со статическим магнитным полем постоянных магнитов.

Конструкции мельниц, использующих переменное магнитное поле, представлены в работах Д.Д. Логвиненко, О.П. Шелякова [10], В.В. Кафарова [21], Ю.М. Кузнецова, В.Н. Ляпунова [22], а также в патентах РФ на полезные модели №№: 68355, 69415, 112072, 45648, 53933; на изобретения №№: 48211; 168264; 179283; 192755; 237309; 325988; 355833; 764717; 856533; 1101291; 1329809; 2049562; 2049563; 2072256; 2072257; 2154602; 2170707; 2224586; 2224589; 2239493; 2243459; 2243601; 2248388; 2303021; 2342987, патенты ВОИС №№ 2007/114731, WO 2009061236, патент Великобритании № 2092464, патент Франции №1329266, патент Японии №20817/63.

В соответствии с [6–7] дана классификация данной группы по:

- виду источника магнитного поля: с плоскими (одно- и двухсторонними) индукторами; с кольцевыми индукторами (явно и неявно полюсного типа); с электромагнитами переменного тока специального исполнения;
- числу источников магнитного поля и способов их расположения относительно объема обработки продукта: с одним или двумя индукторами, расположенными по всей длине камеры измельчения;
- месту расположения источников магнитного поля: на внутренних, на наружных (или одновременно на внутренних и наружных) элементах устройства, образующих рабочий объем (камеру измельчения); на выносном магнитопроводе;
- виду магнитного потока: с постоянной и чередующейся полярностью, с постоянной и изменяющейся индукцией;
- режиму работы электромагнитов: непрерывного и импульсного типа; со встречным и согласным включением обмоток управления;
- форме камеры измельчения: цилиндрическая, кольцевая или специального исполнения;
- форме размольных элементов: сферические, цилиндрические, специального исполнения.

Электромагнитное поле влияет на характер движения мелющих тел и на интенсивность прикладываемых усилий к обрабатываемой среде. В конечном счете данное обстоятельство влияет на степень помола и на технологический эффект от измельчения.

В научной литературе имеется множество публикаций, посвященных преимуществам аппаратов с наружным электромагнитным слоем, большое количество изобретений на данный вид конструкций аппаратов. Тем не менее в промышленности используются и выпускаются в основном электромагнитные измельчители (ЭМИ) [23] и аппараты вихревого слоя (АВС) [24].

Рассмотрим конструктивные особенности электромагнитного измельчителя-активатора (рис. 3,а) [23]. На рис. 3,а позициями обозначено: 1 – трубчатый элемент из алюминия или текстолита; 2 – электромагнитные катушки; 3 – канал для отводящей тепло жидкости; 4 – кожух; 5, 6 – торцевые крышки; 7 – рабочая камера; 8 – сетчатые решетки; 9 – рабочие элементы; 10 – термодатчик; 11 – колодка; 12 – блок управления.

Данный активатор может быть использован для измельчения известняков, необходимых для производства цемента. Новым в данном устройстве является то, что индуктор и рабочая камера закреплены на крышке, при этом в рабочей камере дополнительно установлены сетчатые решетки, а рабочие элементы размещены между ними. Блок управления в данном устройстве обеспечивает электромагнитное поле с индукцией до 0,3 Тл в пределах всего контура рабочей камеры, при этом частота составляет от 400 Гц до 300 кГц.

В данном устройстве ферромагнитные тела не являются помольными телами, так как они создают в измельчаемом материале магнитные поля, благодаря которым и



происходит отрыв частичек по межмолекулярным связям. Таким образом осуществляется активация подаваемого материала.

На рис. 3,б показана схема аппарата вихревого слоя: 1 – цилиндр из немагнитного материала; 2 – индуктор; 3 – металлическая рубашка; 4 – цилиндрическая втулка; 5 – рабочие элементы.

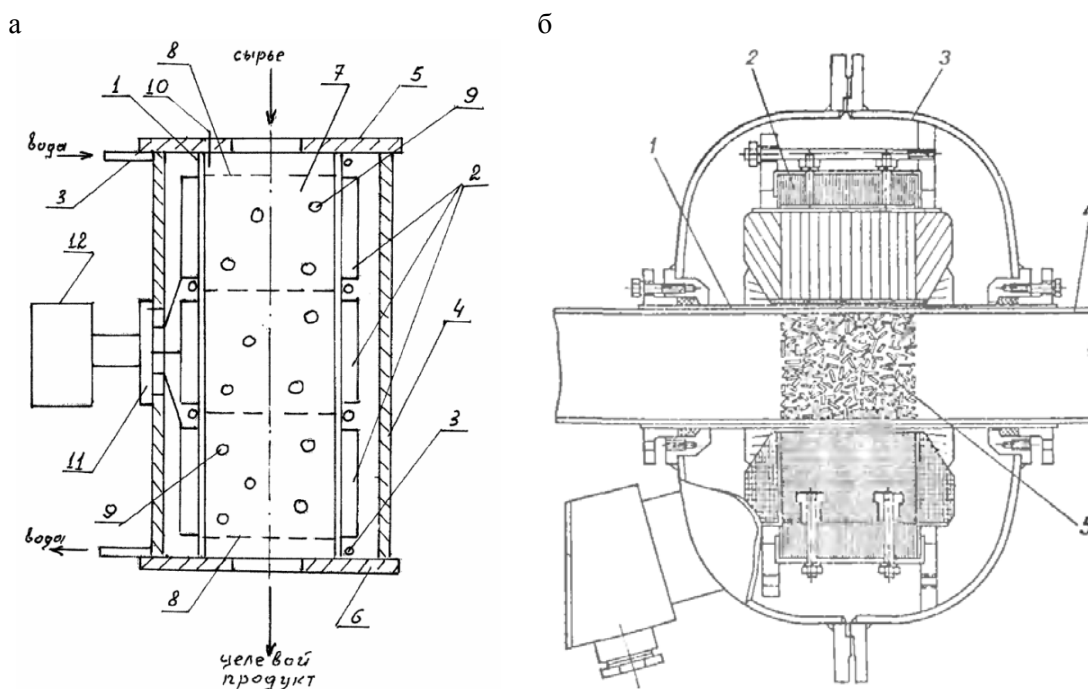


Рис. 3. Аппараты с наружным электромагнитным слоем:  
а – электромагнитный измельчитель-активатор; б – аппарат вихревого слоя

Впервые АВС предложили и разработали Д.Д. Логвиненко и О.П. Шеляков [10]. Первый в мире патент на АВС был получен Д.Д. Логвиненко [24].

Аппараты вихревого слоя реализуют способ измельчения, активации в вихревом слое рабочих элементов; по конструктивному исполнению рабочей камеры и индуктора могут условно делиться в соответствии с рис. 4.

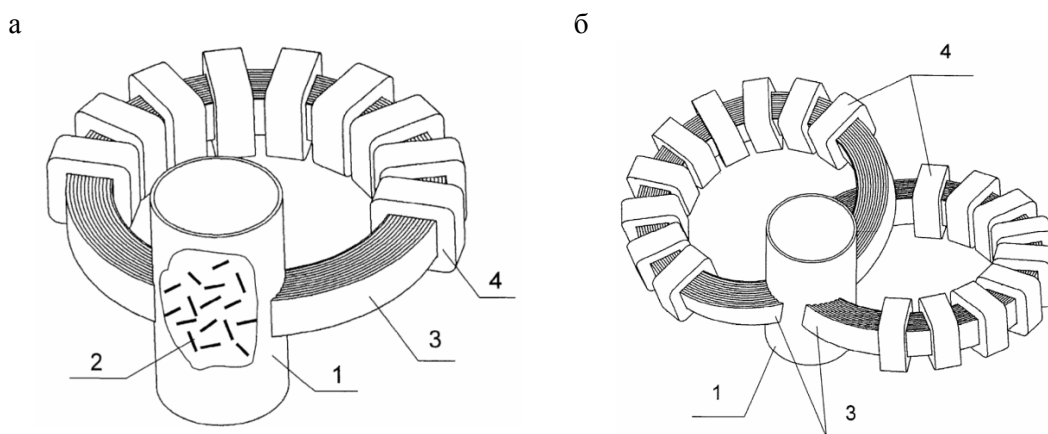


Рис. 4. Примеры конструктивных типов исполнения АВС:  
1 – реакционная камера; 2 – ферромагнитные элементы; 3 – магнитопровод; 4 – катушки;  
а – конструкция АВС с 1 тороидальным магнитопроводом с вырезом под цилиндрическую реакционную камеру; б – конструкция АВС с 2 тороидальными магнитопроводами

Отличием данного аппарата является то, что ферромагнитные элементы в реакционной камере могут находиться под влиянием трех и более магнитных полей, различающихся по направлению и частоте.

Известны аппараты, в которых воздействие на ферромагнитные элементы оказывают противоположно направленные электромагнитные поля. Данные поля в объеме рабочей камеры имеют свойство изменять свою интенсивность и полярность магнитного потока [25].

Существуют электромагнитные аппараты с наружным электромагнитным слоем и для жидкофазных процессов. Так, известен центробежно-вихревой аппарат для центробежно-вихревой обработки сырья для гомогенизации суспензий и получения сверхтонких порошков, в котором рабочая камера выполнена в виде чаши, в верхней части которой размещается вращающаяся магнитная головка, создающая постоянное магнитное поле с величиной напряженности, обеспечивающей центробежно-вихревое движение ферромагнитных элементов за счет их притяжения к магнитной головке. В данном устройстве рабочая камера выполнена в виде съемной чаши [17].

Устройства [13, 15, 17], предназначенные для жидкофазных процессов (обработка сточных вод, гомогенизация суспензий и т.д.), воздействуют на протекаемую через рабочую камеру суспензию потоком электромагнитного поля с находящимися ферромагнитными телами.

В группе АВС [14, 26, 27] и в патенте №112072 приведенные конструкции позволяют варьировать уровнем энергий, действующих на помольные тела, что должно увеличить качество обрабатываемого материала.

В данных аппаратах ферромагнитные частицы сменной вставки выполнены в виде стержней разных размеров.

При увеличении геометрического размера помольных тел повышается и энергия соударения данных частиц друг с другом и обрабатываемым материалом. При этом наличие большого количества помольных тел с малыми размерами способствует более интенсивному перемешиванию и диспергации.

Известны аппараты вихревого слоя с непрерывным технологическим процессом. Так, аппарат вихревого слоя (рис. 5, а) содержит реакционную камеру в виде трубы 1 из немагнитного материала, в рабочей зоне которой расположена выполненная из немагнитных материалов сменная вставка 2 с ферромагнитными частицами (иголками) 3. Труба 1 размещена в осевом канале индуктора 4 с зазором 5. Индуктор 4 снаружи имеет обечайку 6, а труба 1 фиксируется в его осевом канале с помощью установочных винтов 7. Индуктор 4 с трубой 1 заключен в кожух 8, соединенный с крышками 9, 10 через уплотнения 11 и 12. На крышке 10 есть патрубок 13 подвода среды. Крышка 10 снабжена патрубком 14 для подвода охлаждающей среды, сообщенным с коллектором 15. Между обечайкой 6 и кожухом 8 образован кольцевой зазор 16. Стенка коллектора 15, обращенная к индуктору 4, имеет кольцевую проточку 17, в которой плотно установлен торец обечайки 6. По обе стороны проточки 17 выполнены отверстия 18 и 19 для прохода среды в зазоры 5 и 16. Питание индуктора 4 производят через токовод 20, энергия к которому поступает от блока управления.

Совершенствование вышеприведенной конструкции рассматривается в работе В.Г. Обухова и др. [28]. Схема аппарата показана на рис. 5, б.

Установка электромагнитного поля содержит основную трубу из немагнитного материала 1, внутри которой расположена цилиндрическая сменная вставка 2 с ферромагнитными частицами (иголками) 3. Труба 1 размещена в осевом канале индуктора 4 с зазором 5. Индуктор 4 снаружи имеет обечайку 6, а труба 1 фиксируется в его осевом канале с помощью установочных винтов 7. Индуктор 4 с трубой 1 заключен в кожух 8, соединенный с крышками 9, 10 через уплотнения 11, 12. На крышке 10 расположен патрубок 13 подвода среды. Крышка 10 снабжена патрубком 14 для подвода охлаждающей среды, сообщенным с коллектором 15. Между обечайкой 6 и кожухом 8 образован кольцевой зазор 16. Стенка коллектора 15, обращенная к индуктору 4, имеет кольцевую проточку 17, в которой плотно установлен торец обечайки 6. По обе стороны проточки 17 выполнены отверстия 18 и 19 для прохода охлаждающей среды в зазоры 5 и 16. Сменная вставка 2 закреплена в трубе 1 двумя подшипниками 21, с помощью которых происходит вращение сменной вставки 2. В нижней части сменной вставки 2 расположено кольцо 22, выполненное из постоянных магнитов. Величина

магнитного поля постоянных магнитов значительно меньше величины электромагнитного поля рабочей зоны установки. Постоянные магниты кольца 22 служат для улавливания ферромагнитных частиц (иголок) 3, которые при выключении установки перемещаются в нижнюю часть сменной вставки 2.

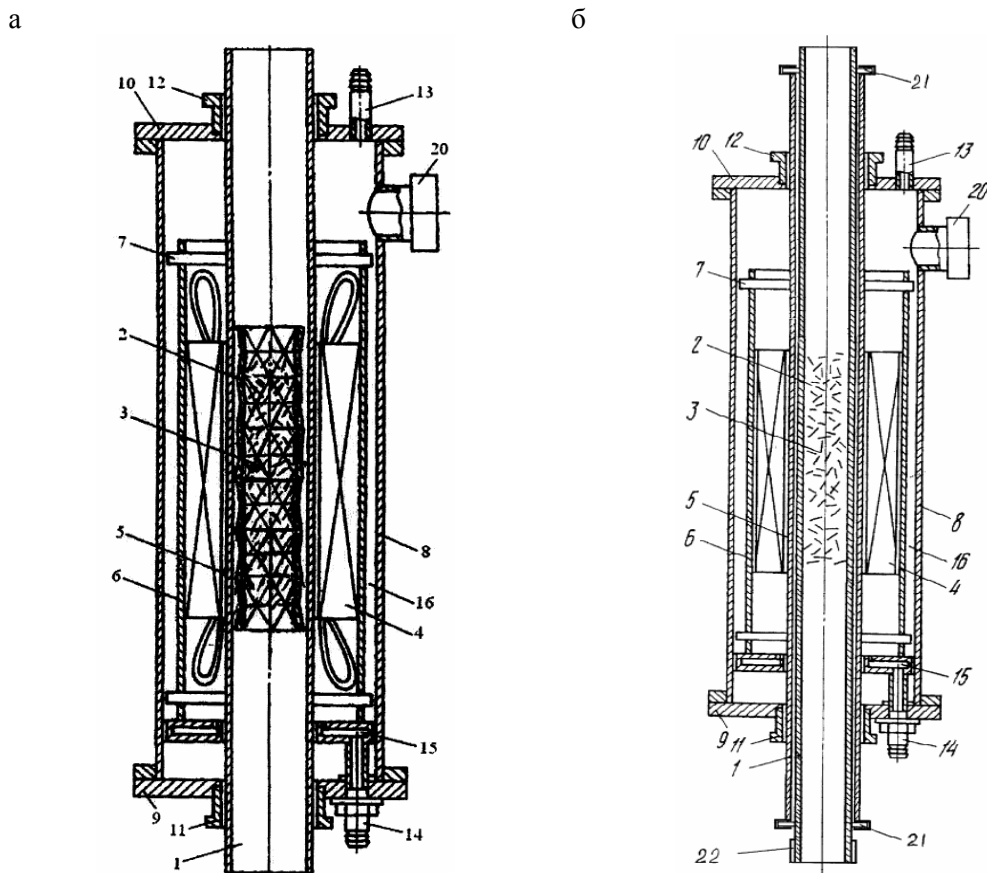


Рис. 5. Аппараты вихревого слоя:  
а – АВС непрерывного действия; б – установка электромагнитного поля

Необычная конструкция смесителя была предложена Г.М. Горшковым [29]. Необычность данной конструкции в том, что рабочая камера (якорь) представляет собой эластичный постоянный магнит, выполненный в виде трубы. При работе данного устройства рабочая камера меняет свою форму (имеются выпуклые и вогнутые участки). Если изменять направление токов в электромагнитных катушках, то можно увеличить число получаемых форм рабочей камеры (якоря).

Разработка аппаратов АВС и их промышленное внедрение осуществляются также в Польше [30, 31]. Так, на рис. 6,а изображена электромагнитная мельница, представляющая собой индуктор магнитного поля 1, с собственной системой охлаждения 2 и рабочей камерой 3 с ферромагнитными элементами 4. Индуктор электромагнитной мельницы состоит из сердечника индуктора 5, корпуса 6 и обмотки 7. На рис. 6,б и 6,в представлены электромагнитные мельницы компании ELTRAF.

В настоящее время производителей аппаратов АВС очень мало, одними из них являются: ООО «ГЛОУБКОР» [32] (выпускает аппараты АВС-100, АВС-150 мощностью от 4,5 до 9,5 кВт); ООО «Аппарат-нн» [33] (выпускает аппараты от марки АВС 5,5.55.220 до марки АВС 2х22.135.248 мощностью от 5,5 до 44 кВт·ч); ООО «Регион-меттранс» [34] (выпускаемые аппараты используются в линии по производству масла, а также производит аппараты АВС-700 мощностью 3,5 кВт и АВС-2000 мощностью 7,5 кВт).

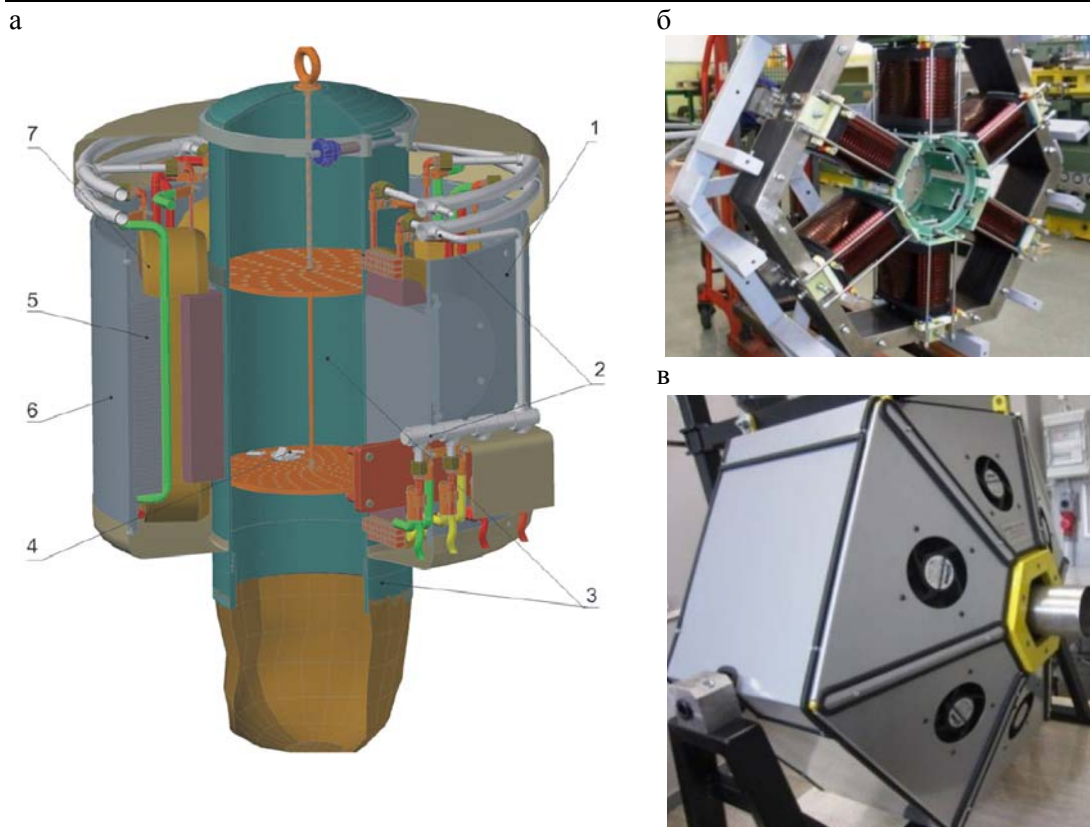


Рис. 6. Аппараты АВС:  
 а – электромагнитная мельница; б – электромагниты;  
 в – мельница с корпусом и рабочей камерой

На основе анализа отечественной и зарубежной литературы авторы составили классификацию современных аппаратов с наружным электромагнитным слоем (табл. 2). Данная таблица может быть полезна при выборе типа аппарата в зависимости от требуемого технологического процесса.

Т а б л и ц а 2

Конструктивные решения аппаратов с наружным электромагнитным слоем

Варианты решений	Виды	Применение
1	2	3
Конструктивное оформление	– Аппараты для жидкофазных процессов – Аппараты для диспергирования сыпучих материалов	Для активации жидкофазных или порошкообразных материалов
Расположение индуктора	– Наружное – Внутреннее	При выборе технологического процесса (например обеззараживание сточных вод)
Форма индуктора	– С-образная – Тороидальная	При выборе способа производства аппарата
Направление действия магнитного поля	– Вращающееся – Противоположно направленное – Линейное	При выборе степени активации обрабатываемого материала
Форма ферромагнитных элементов	– Цилиндрическая – Шар – Диски – Конус – Ролики	При выборе степени воздействия на обрабатываемый материал

1	2	3
Форма сечения рабочей камеры	– Цилиндрическая – Прямоугольная – В форме шара – Кубическая – Произвольная	При совмещении с действующим технологическим циклом
Расположение рабочей камеры	– Стационарное – Съёмное	При периодических или непрерывных технологических актах

Сегодня аппараты АВС используются в различных областях промышленности. В строительной индустрии их применяют для получения экологических бетонов с использованием отходов шлака [35], безобжиговых ангидритовых вяжущих [36], известково-песчаных изделий [37] и др. Многие исследователи, как правило, отмечают положительный эффект от обработки минерального компонента в АВС. Так, в работе [35] отмечается значительное повышение прочности бетона (до 30 МПа) при введении металлургического шлака, обработанного в аппарате электромагнитной активации, а в работе [38] говорится о повышении скорости получения нанопорошков кобальта в 4–5 раз.

Авторы [39, 40] показали эффективность применения АВС для диспергирования пигментов и наполнителей в технологии производства широкого спектра композиционных материалов, а также для получения красок, клеев и др.

В работах авторов И.А. Филонова, Х.С. Явруяна [41, 42] показана возможность получения неавтоклавного пенобетона путем активации портландцемента в аппарате вихревого слоя. Образцы, полученные путем активации вяжущего в аппарате АВС, имеют большую прочность на сжатие благодаря упрочнению межпоровых перегородок. Также можно отметить работы, в которых описаны повышение прочности серного бетона [43, 44], эластомерных композиций [45], цементного камня и бетона [46, 47], а также увеличение гидратной активности синтанита [48].

Кроме фиксации эффекта от обработки в АВС в ряде работ выдвигаются гипотезы его возникновения, а также предлагаются методы оценки степени механоактивации минеральных компонентов и вяжущих. Так, В.И. Кондращенко выдвинул гипотезу модификации формы частиц цемента, обработанного в АВС, от угловатой к более окатанной [49]. При этом увеличение тонкости помола портландцемента, обработанного в АВС, не приводит к повышению водоцементного отношения при изготовлении растворных смесей равной подвижности. В работах [50-52] предложена методика оценки механоактивации минеральных компонентов строительных материалов.

Таким образом, в последнее время наблюдается значительный рост исследований, связанных не только с совершенствованием конструкции аппаратов АВС, но и их применением, в том числе промышленным, при производстве и диспергировании строительных материалов, красок, масел, при получении цементных, гипсовых и известково-песчаных композитов и др.

Научно обоснованное применение рассмотренного способа обработки минеральных компонентов строительных материалов должно основываться не только на выявленных эффектах, но и на совершенствовании методик оценки возникновения и релаксации эффекта механоактивации, установлении и обобщении новых знаний о структурообразовании строительных композитов на активированных компонентах, оптимизации составов и режимов изготовления технико-экономически эффективных строительных материалов.

### Список литературы

1. Васильев, П.С. Энергоэффективность измельчения сыпучих материалов в планетарных шаровых мельницах / П.С. Васильев, Ю.Ю. Матасова, Е.М. Чебаткова //

Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2019. – № 4 (29). – С. 13–19.

2. Абдулова, С.Р. Вибрационные мельницы: аспекты классификации / С.Р. Абдулова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 3 (98). – С. 30–34.

3. Смирнов, С.Ф. Расчетно-экспериментальные исследования классификации в струйной мельнице кипящего слоя / С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, С.В. Федосов, Н. Otwinowski, P. Kaniowski // Строительные материалы. – 2009. – № 2. – С. 61–63.

4. Гарабажиу, А.А. Физическое моделирование процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторно-центробежной мельнице / А.А. Гарабажиу, В.Ю. Мурог // Химическая промышленность сегодня. – 2004. – № 2. – С. 36.

5. Францкевич, В.С. Исследование аэродинамики валковой мельницы с динамическим классификатором / В.С. Францкевич // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2018. – № 1 (205). – С. 122–127.

6. Беззубцева, М.М. Классификация электромагнитных мельниц / М.М. Беззубцева, В.С. Волков, В.А. Ружьев // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 9. – С. 103–104.

7. Беззубцева, М.М. Анализ классификации мельниц по способу формирования диспергирующего усилия / М.М. Беззубцева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12–2. – С. 185–189.

8. Rumpf, H. Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft / H. Rumpf // Chemie Ingenieur Technik – CIT 37.3 (1965), Seiten 187–202.

9. Stie, M. Mechanische / M. Stie // Verfahrenstechnik. korrr. Nachdr. – Berlin: Springer, 2001.

10. Логвиненко, Д.Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах вихревого слоя / Д.Д. Логвиненко, О.П. Шеляков. – М.: Техника, 1976. – 144 с.

11. Пат. № 2085547 Российская Федерация, С04В 40/00. Способ обработки строительного материала / Щербаков А.С., Давыдов В.Ф., Григорьева О.Ю. опубл. 27.07.1997. – 9 с.

12. Пат. №2725717 Российская Федерация, С04В 40/00. Способ приготовления бетонной смеси / Ибрагимов Р.А., Дебердеев Т.Р., Дебердеев Р.Я., Королев Е.В. опубл. 03.07.2020. Бюл. №19. – 5 с.

13. Пат. №2524727 Российская Федерация. Аппарат вихревого слоя / Мантузов А.В., Зарезов М.А., Тарасов С.Г., Панчугин В.А. опубл. 10.08.2014. Бюл. №22. – 7 с.

14. Пат. № 2614009 Российская Федерация. Аппарат вихревого слоя / Серга Г.В., Кочубей А.А., Лебедев В.А. опубл. 22.03.2017. Бюл. №9. – 19 с.

15. Пат. № 2669274 Российская Федерация. Реактор вихревого электромагнитного слоя / Рубеко П.В. опубл. 09.10.2018. Бюл. №28. – 11 с.

16. Пат. № 2461416 Российская Федерация. Электромагнитный аппарат вихревого слоя и способ его изготовления / Жолобов Л.А., Мироносецкий С.Н., Самохвалов С.В., Смирнов В.И., Шумилов А.А. опубл. 20.09.2020. Бюл. №26. – 17 с.

17. Пат. № 2653021 Российская Федерация. Способ центробежно-вихревой обработки сырья и аппарат центробежно-вихревой / Абубикеров Д.Р., Гладков Н.А., Касьянов В.Е., Подсекин А.В., Щербак К.А. опубл. 04.05.2018. Бюл. №13. – 14 с.

18. Беззубцева, М.М. Классификация электромагнитных измельчителей для пищевого сельскохозяйственного сырья / М.М. Беззубцева, И.С. Платашенков, В.С. Волков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – № 10. – С. 150–153.

19. Беззубцева, М.М. Критерии износа рабочих органов электромагнитных механоактиваторов / М.М. Беззубцева, В.С. Волков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 7. – С. 119–120.

20. Беззубцева, М.М. Исследование аппаратов с магнитооживленным слоем / М.М. Беззубцева, В.С. Волков, В.В. Зубков // Фундаментальные исследования. – 2013. – №6 (часть 2). – С. 258–262.

21. Вердиян, М.А. Анализ технологических схем измельчения / М.А. Вердиян, В.В. Кафаров, В.Л. Петров // Цемент и его применение. – 2005. – № 4. – С. 15.
22. Амбросимов, Ё.А. Электромагнитное измельчение материалов / Ё.А. Амбросимов, Ю.М. Кузнецов, В.Н. Ляпунов [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1976. – С. 39–40.
23. Сеидов, А.З. Электромагнитный измельчитель-активатор: патент на полезную модель № 95558 / Сеидов А.З, Сависько И.О., Фатеев А.В. – 2010.
24. Пат. № 168264 СССР. Реактор для проведения процессов в «кипящем» слое / Логвиненко Д.Д. Заявка: 863034/23-4, 1963.10.25. Опубл.: 1965.02.18.
25. Беззубцева, М.М. Механоактиваторы агропромышленного комплекса. Анализ, инновации, изобретения: монография / М.М. Беззубцева, В.С. Волков. – СПб.: СПбГАУ, 2014. – 161 с.
26. Пат. № 2613517 Российская Федерация. Аппарат вихревого слоя непрерывного действия / Серга Г.В., Кочубей А.А., Лебедев В.А. опубл. 16.03.2017. Бюл. № 8. – 19 с.
27. Пат. № 2614013 Российская Федерация. Аппарат слоя вихревого / Серга Г.В., Кочубей А.А., Лебедев В.А. опубл. 22.03.2017. Бюл. № 9. – 16 с.
28. Пат. № 96504 Российская Федерация. Установка электромагнитного поля / Обухов В.Г., Обухов Г.В., Алехин А.С., Алехина Л.А., Ефремов С.Е., Казанцев Р.В. опубл. 10.08.2010. Бюл. № 22. – 2 с.
29. Пат. № 2478422 Российская Федерация. Электромагнитный смеситель / Горшков Г.М. опубл. 10.04.2013. Бюл. № 10. – 5 с.
30. Dariusz, Calus. Analysis of interaction of forces of working elements in electromagnetic mill / Calus Dariusz, Oleksandr Makarchuk // Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. – 1(12). – P.64–69. – DOI: 10.15199/48.2019.12.12
31. Ogonowski, Szymon. Multi-Objective and Multi-Rate Control of the Grinding and Classification Circuit with Electromagnetic Mill / Szymon Ogonowski, Zbigniew Ogonowski, Marek Pawelczyk // Applied Sciences. – 2018. – 8(4). – P.506. – DOI: 10.3390/app8040506
32. <https://avs.globecore.ru/products/avs-150.html>
33. <https://www.apparat-nn.ru/avs>
34. <http://www.vortexprom.ru/>
35. Mazov, Ilya Metallurgical Slag-Based Concrete Materials Produced by Vortex Electromagnetic Activation / Ilya Mazov [end al.] // Key Engineering Materials. – 2016. – 683. – P.221–226. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.683.221
36. Мирская, М.В. Аппараты вихревого слоя в производстве безобжиговых ангидритовых вяжущих / М.В. Мирская // Инженерный вестник Дона. – 2008. – №2 (4). – С. 66–76.
37. Ibragimov, R.A. Mechanical activation in the production of lime-sand mixtures / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – 98(6). – Article No. 9804. – DOI: 10.18720/MCE.98.4
38. Нгуен, В.М. Исследование влияния электромагнитного поля и энергомеханической обработки на процесс получения наноразмерных порошков металлического кобальта восстановлением водородом / В.М. Нгуен, Ю.В. Конюхов, Д.И. Рыжонков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 96–101.
39. Феоктистова, Е.П. Интенсификация процессов получения композиционных материалов в аппаратах вихревого слоя / Е.П. Феоктистова, Е.А. Захарычев, В.А. Войтович, Р.Р. Шварев // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы II Всероссийской научно-технической конференции / Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. – М., 2017. – С. 241–253.
40. Войтович, В.А. Эффективность применения аппаратов вихревого слоя в процессах измельчения порошковых материалов / В.А. Войтович, Р.Р. Шварев, Е.А. Захарычев, Е.П. Феоктистова, Р.Я. Дебердеев, Н.С. Захарычева // Новые

огнеупоры. – 2017. – №10. – Р. 48–53. – URL: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-10-48-53>

41. Филонов, И.А. Механическая активация портландцемента в аппарате вихревого слоя / И.А. Филонов, Х.С. Явруян // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 3 (21). – С. 678–681.

42. Явруян, Х.С. Гомогенизация наномодифицированных цементных систем и подбор параметров их обработки в установках с вихревым слоем / Х.С. Явруян, И.А. Филонов // Вестник МГСУ. – 2013. – № 2. – С. 130–136.

43. Шаяхмедов, Р.И. Серобетон и аппарат вихревого слоя / Р.И. Шаяхмедов, А.П. Журавлев // Перспективы развития строительного комплекса. – 2012. – Т. 1. – С. 19.

44. Страхова, Н.А. Композиционные материалы специального назначения / Н.А. Страхова, Б.Б. Утегенов, Н.А. Белова, Л.П. Кортюченко // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 2 (32). – С. 12–16.

45. Ершов, Д.В. Механохимическая активация углеродных материалов в аппарате с вихревым слоем / Д.В. Ершов // Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51 (11). – С. 81–83.

46. Ibragimov, R.A. Efficient complex activation of Portland cement through processing it in the vortex layer machine / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev, V.V. Leksin // Structural Concrete. – 2019. – №20(2). – P. 851–859. – <https://doi.org/10.1002/suco.201800008>

47. Закуражнов, М.С. Механохимическая активация комплексной добавки на основе микрокремнезема для модифицирования структуры цементного камня / М.С. Закуражнов, О.В. Артамонова, М.А. Шведова, Ю.В. Макушина // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 1 (72). – С. 125–131.

48. Kaklyugin, A. Using apparatus with vortex layer of ferromagnetic particles for production of unburnt synthanite / A. Kaklyugin, I. Trishchenko, A. Kozlov, L. Kastornykh // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 196(2):04053. – DOI: 10.1051/mateconf/201819604053

49. Кондращенко, В.И. Активация цемента в мельнице вихревого типа. Часть 1. Свойства активированного в вихревой мельнице цемента / В.И. Кондращенко, С.П. Титов // Техника и технология силикатов. – 2019. – Т. 26, № 4. – С. 115–119.

50. Ibragimov, R.A. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev, V.V. Leksin // ZKG International. – 2018. – №5. – P. 28–35.

51. Ibragimov, R.A. Properties of the building gypsum treated by the vortex layer apparatus / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev // ZKG International. – 2019. – №5. – P. 26–32.

52. Ibragimov, R.A. Mechanical activation in the production of lime-sand mixtures / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – 98(6). – Article No. 9804. – DOI: 10.18720/MCE.98.4

## References

1. Vasiliev, P.S. Energy efficiency from grinding bulk materials in planetary ball mills / P.S. Vasiliev, Yu.Yu. Matasova, E.M. Chebatkova // Energy and resource saving: industry and transport. – 2019. – № 4 (29). – P. 13–19.

2. Abdulova, S.R. Vibration mills: aspects of classification / S.R. Abdulova // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. – 2015. – №. 3 (98). – P. 30–34.

3. Smirnov, S.F. Calculation and experimental studies of classification in a fluidized bed jet mill / S.F. Smirnov, V.P. Zhukov, S.V. Fedosov, H. Otwinowski, R. Kaniowski // Building materials. – 2009. – №2. – P. 61–63.

4. Garabazhiu, A.A. Physical modeling of processes of grinding and classification of bulk materials in a rotary centrifugal mill / A.A. Garabazhiu, V.Yu. Murog // The chemical industry today. – 2004. – № 2. – P. 36.



5. Frantskevich, V.S. Investigation of the aerodynamics of a roller mill with a dynamic classifier / V.S. Frantskevich // Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technology, biotechnology, geocology. – 2018. – № 1 (205). – P. 122–127.
6. Bezzubtseva, M.M. Classification of electromagnetic mills / M.M. Bezzubtseva, V.S. Volkov, V.A. Ruzhev // International Journal of Experimental Education. – 2015. – № 9. – P. 103–104.
7. Bezzubtseva, M.M. Analysis of the classification of mills by the method of forming the dispersing force / M.M. Bezzubtseva // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2016. – №. 12–2. – P. 185–189.
8. Rumpf, H. Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft / H. Rumpf // Chemie Ingenieur Technik – CIT 37.3 (1965), Seiten 187–202.
9. Stie, M. Mechanische / M. Stie // Verfahrenstechnik. korr. Nachdr. – Berlin: Springer, 2001.
10. Logvinenko, D.D. Intensification of technological processes in the devices of the vortex layer / D.D. Logvinenko, O.P. Shelyakov. – M.: Technique, 1976. – 144 p.
11. Pat. № 2085547 Russian Federation, C04B 40/00. Method of processing building material / Shcherbakov A.S., Davydov V.F., Grigorieva O.Yu. publ. 07.27.1997. – 9 p.
12. Pat. №2725717 Russian Federation, C04B 40/00. Method for the preparation of concrete mixture / Ibragimov R.A., Deberdeev T.R., Deberdeev R.Ya., Korolev E.V. publ. 03.07.2020. – Bul. №19. – 5 p.
13. Pat. № 2524727 Russian Federation. Vortex layer apparatus / Mantuzov A.V., Zarezov M.A., Tarasov S.G., Panchugin V.A. publ. 08.10.2014. – Bul. №22. – 7 p.
14. Pat. № 2614009 Russian Federation. Vortex layer apparatus / Serga G.V., Kochubey A.A., Lebedev V.A. publ. 22.03.2017. – Bul. № 9. – 19 p.
15. Pat. №2669274 Russian Federation. Reactor of a vortex electromagnetic layer / Rubeko P.V. publ. 09.10.2018. – Bul. №28. – 11 p.
16. Pat. No. 2461416 Russian Federation. Electromagnetic apparatus of the vortex layer and the method of its manufacture / Zholobov L.A., Mironosetsky S.N., Samokhvalov S.V., Smirnov V.I., Shumilov A.A. publ. 20.09.2020. – Bul. № 26. – 17 p.
17. Pat. № 2653021 Russian Federation. Method of centrifugal-vortex processing of raw materials and apparatus of centrifugal-vortex / Abubikerov D.R., Gladkov N.A., Kas'yanov V.E., Podsekin A.V., Shcherbak K.A. publ. 05.04.2018. – Bul. №13. – 14 p.
18. Bezzubtseva, M.M. Classification of electromagnetic grinders for food agricultural raw materials / M.M. Bezzubtseva, I.S. Platashenkov, V.S. Volkov // News of the St. Petersburg State Agrarian University. – 2008. – №10. – P. 150–153.
19. Bezzubtseva, M.M. Wear criteria for working bodies of electromagnetic mechanical activators / M.M. Bezzubtseva, V.S. Volkov // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2012. – № 7. – P. 119–120.
20. Bezzubtseva, M.M. Investigation of devices with a magnetic fluidized layer / M.M. Bezzubtseva, V.S. Volkov, V.V. Zubkov // Fundamental research. – 2013.– №6 (part 2). – P. 258–262.
21. Verdiyana, M.A. Analysis of grinding technological schemes / M.A. Verdiyana, V.V. Kafarov, V.L. Petrov // Cement and its application. – 2005. – №. 4. – P. 15.
22. Ambrosimov, Y.A. Electromagnetic grinding of materials / Y.A. Ambrosimov, Yu.M. Kuznetsov, V.N. Lyapunov [and all] // Electronic processing of materials. – 1976. – P. 39–40.
23. Seyidov, A.Z. Electromagnetic grinder-activator: utility model patent: № 95558/ Seyidov A.Z., Savisko I.O., Fateev A.V.. – 2010.
24. Pat. 168264 USSR. Reactor for Carrying out processes in a «fluidized» bed / Logvinenko D. D. Application: 863034 / 23-4, 1963.10.25. Publ. : 1965.02.18.
25. Bezzubtseva, M.M. Mechanical activators of the agro-industrial complex. Analysis, innovations, inventions: monograph / M.M. Bezzubtseva, V.S. Volkov. – SPb.: SPbGAU, 2014. – 161 p.

26. Pat. №2613517 Russian Federation. Continuous vortex layer apparatus / Serga G.V., Kochubei A.A., Lebedev V.A. publ. 03.16.2017. – Bul. № 8. – 19 p.
27. Pat. №2614013 Russian Federation. Vortex layer apparatus / Serga G.V., Kochubey A.A., Lebedev V.A. publ. 22.03.2017. – Bul. № 9. – 16 p.
28. Pat. № 96504 Russian Federation. Installation of the electromagnetic field / Obukhov V.G., Obukhov G.V., Alekhin A.S., Alekhina L.A., Efremov S.E., Kazantsev R.V. publ. 10.08.2010. – Bul. №22. – 2 p.
29. Pat. №2478422 Russian Federation. Electromagnetic mixer / Gorshkov G.M. publ. 10.04.2013. – Bul. № 10. – 5 p.
30. Dariusz, Calus. Analysis of interaction of forces of working elements in electromagnetic mill / Calus Dariusz, Oleksandr Makarchuk // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2019. – 1(12). – P.64–69. – DOI: 10.15199/48.2019.12.12
31. Ogonowski, Szymon. Multi-Objective and Multi-Rate Control of the Grinding and Classification Circuit with Electromagnetic Mill / Szymon Ogonowski, Zbigniew Ogonowski, Marek Pawelczyk // *Applied Sciences*. – 2018. – 8(4). – P.506. – DOI: 10.3390/app8040506
32. <https://avs.globecore.ru/products/avs-150.html>
33. <https://www.apparat-nn.ru/avs>
34. <http://www.vortexprom.ru/>
35. Mazov, Ilya Metallurgical Slag-Based Concrete Materials Produced by Vortex Electromagnetic Activation / Ilya Mazov [end al.] // *Key Engineering Materials*. – 2016. – 683. – P.221–226. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.683.221
36. Mirskaya, M.V. Vortex bed apparatus in the production of non-fired an-hydrate binders / M.V. Mirskaya // *Engineering Bulletin of Don*. – 2008. – №2 (4). – P. 66–76.
37. Ibragimov, R.A. Mechanical activation in the production of lime-sand mixtures / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev // *Magazine of Civil Engineering*. – 2020. – 98(6). – Article No. 9804. – DOI: 10.18720/MCE.98.4
38. Nguyen, V.M. Investigation of the influence of the electromagnetic field and energy-mechanical treatment on the process of obtaining nanosized powders of metallic cobalt by reduction with hydrogen / V.M. Nguyen, Yu.V., Konyukhov D.I. Ryzhonkov // *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*. – 2018. – Vol. 61. – № 2. – P. 96–101.
39. Feoktistova, E.P. Intensification of the processes of obtaining composite materials in the apparatus of the vortex layer / E.P. Feoktistova, E.A., Zakharychev V.A. Voitovich, R.R. Shvarev // *Polymer composite materials and production technologies of a new generation: Materials of the II All-Russian Scientific and Technical Conference / All-Russian Research Institute of Aviation Materials*. – 2017. – P. 241–253.
40. Voitovich, V.A. The effectiveness of the vortex layer apparatus in the processes of grinding powder materials / V.A. Voitovich, R.R. Shvarev, E.A. Zakharychev, E.P. Feoktistova, R.Ya. Deberdeev, N.S. Zakharycheva // *New refractories*. – 2017. – № 10. – P. 48–53. – URL: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-10-48-53>
41. Filonov, I.A. Mechanical activation of Portland cement in the vortex layer apparatus / I.A. Filonov, Kh.S. Yavruyan // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2012. – №3 (21). – P. 678–681.
42. Yavruyan, Kh.S. Homogenization of nanomodified cement systems and selection of parameters for their processing in installations with a vortex layer / Kh.S. Yavruyan, I.A. Filonov // *Vestnik MGSU*. – 2013. – № 2. – P. 130–136.
43. Shayakhmedov, R.I. Sulfur concrete and the vortex layer apparatus / R.I. Shayakhmedov, A.P. Zhuravlev // *Prospects for the development of the building complex*. – 2012. – Vol. 1. – P. 19.
44. Strakhova, N.A. Composite materials for special purposes / N.A. Strakhova, B.B. Utegenov, N.A. Belova, L.P. Kortovenko // *The Caspian Engineering and Construction Bulletin*. – 2020. – № 2 (32). – P. 12–16.
45. Ershov, D.V. Mechanochemical activation of carbon materials in an apparatus with a vortex layer / D.V. Ershov // *Chemistry and Chemical Technology*. – 2008. – Vol. 51 (11). – P. 81–83.

46. Ibragimov, R.A. Efficient complex activation of Portland cement through processing it in the vortex layer machine / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev, V.V. Leksin // *Structural Concrete*. – 2019. – №20(2). – P. 851–859. – <https://doi.org/10.1002/suco.201800008>
47. Zakurazhnov, M.S. Mechanochemical activation of a complex additive based on microsilica for modifying the structure of a cement stone / M.S. Zakurazhnov, O.V. Artamonova, M.A. Shvedova, Yu.V. Makushina // *Bulletin of Civil Engineers*. – 2019. – №1 (72). – P. 125–131.
48. Kaklyugin, A. Using apparatus with vortex layer of ferromagnetic particles for production of unburnt synthanite / A. Kaklyugin, I. Trishchenko, A. Kozlov, L. Kastornykh // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – 196(2):04053. – DOI: 10.1051/mateconf/201819604053
49. Kondrashchenko, V.I. Cement activation in a vortex mill. Part 1. Properties of cement activated in a vortex mill / V.I. Kondrashchenko, S.P. Titov // *Technique and technology of silicates*. – 2019. – Vol. 26, № 4. – P. 115–119.
50. Ibragimov, R.A. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev, V.V. Leksin // *ZKG International*. – 2018. – №5. – P. 28–35.
51. Ibragimov, R.A. Properties of the building gypsum treated by the vortex layer apparatus / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev // *ZKG International*. – 2019. – №5. – P. 26–32.
52. Ibragimov, R.A. Mechanical activation in the production of lime-sand mixtures / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev // *Magazine of Civil Engineering*. – 2020. – 98(6). – Article No. 9804. – DOI: 10.18720/MCE.98.4

УДК 691.3

*Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова*

Россия, 308012, Белгород,  
ул. Костюкова, д. 46,  
тел. (4722) 55-15-91

**Лесовик Валерий Станиславович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительное  
материаловедение, изделия  
и конструкции», член-корреспондент  
РААСН  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Елистраткин Михаил Юрьевич,**  
доцент кафедры «Строительное  
материаловедение, изделия  
и конструкции»  
E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

**Сальникова Алёна Сергеевна,**  
ассистент кафедры «Строительное  
материаловедение, изделия  
и конструкции»  
E-mail: privet.9292@mail.ru

**Казлитина Ольга Викторовна,**  
доцент кафедры «Строительное  
материаловедение, изделия  
и конструкции»  
E-mail: olga-ivashova1@yandex.ru

*Belgorod State Technological University.  
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukov St.,  
tel. (4722) 55-15-91

**Lesovik Valery Stanislavovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Construction Materials Science,  
Products and Structures», corresponding  
member to RAASN  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Elistratkin Mikhail Yuryevich,**  
Associate Professor of the department  
«Construction Materials Science, Products  
and Structures»  
E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

**Salnikova Alena Sergeevna,**  
Assistant of the department «Construction  
Materials Science, Products and Structures»  
E-mail: privet.9292@mail.ru

**Kazlitina Olga Viktorovna,**  
Associate Professor of the department  
«Construction Materials Science, Products  
and Structures»  
E-mail: olga-ivashova1@yandex.ru

## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ\*

В.С. Лесовик, М.Ю. Елистраткин, А.С. Сальникова, О.В. Казлитина

Предложена методика сравнения разнопрочных составов, позволяющая достаточно просто и наглядно проводить оценку влияния исследуемых факторов. Согласно полученным данным большое значение имеет не только расход клинкерной составляющей, но и в первую очередь полнота его реализации, что можно достичь сбалансированным составом композиционного вяжущего.

*Ключевые слова: высокопрочный бетон, композиционное вяжущее, самоуплотняющаяся смесь, гиперпластификатор, карбонатосодержащие наполнители, клинкерная составляющая*

## ON THE ISSUE OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH- STRENGTH SELF-COMPACTING CONCRETES

V.S. Lesovik, M.Y. Elistratkin, A.S. Salnikova, O.V. Kazlitina

In this paper we propose a method of comparing heterogeneous compositions, which allows to assess the influence of the studied factors quite simply and clearly. According to the data obtained, it is not only the consumption of the clinker component that is of great importance, but, first of all, the

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-24113.

completeness of its implementation, which can be achieved by a balanced composition of the composite binder.

*Keywords: high-strength concrete, composite binder, self-compacting mixture, hyperplasticizer, carbonate-containing fillers, clinker component*

**Введение.** Современное строительство является динамично развивающейся отраслью, достаточно активно осваивающей новые материалы и технологии. Общей тенденцией является увеличение пролетности и этажности возводимых сооружений, что влечет за собой рост требований по прочности применяемых материалов, в частности бетонов. Так, на смену обычным бетонам при решении подобных задач пришли высокопрочные бетоны, имеющие класс по прочности  $>B60$ , а зачастую превышающий  $B100$ . Однако в настоящий момент производство и применение подобных бетонов сопряжены с рядом трудностей как технологического (многокомпонентность, многостадийность технологии, необходимость строгого контроля всех этапов производственного цикла и т.д.), так и экономического (высокая стоимость) характера. По этой причине высокопрочные бетоны, в частности в России, испытывают сильную конкуренцию со стороны металлических конструкций, по ряду показателей заведомо уступающих им (пожаробезопасность, долговечность, стоимость).

Зарубежным опытом неоднократно подтверждена высокая эффективность высокопрочного бетона при решении разнообразных задач, например мост Gaertnerplatz в Германии или взлетно-посадочная полоса аэропорта Haneda в Японии [1]. Использование высокопрочного бетона также достаточно полно отвечает концепции зеленого строительства, диктующей необходимость максимального ресурсосбережения, в том числе в строительной отрасли. Рациональным способом при этом является уменьшение эффективного сечения применяемых конструкций, которое невозможно без существенного увеличения прочностных показателей материалов, предпочтительно достигаемого за счет повышения эффективности использования применяемого сырья.

В рамках данной работы целью ставилась разработка композиционных вяжущих, направленная на реализацию различных способов повышения их эффективности, высокопрочных бетонов на их основе, а также осуществление численной оценки результативности применяемых подходов и методов.

**Результаты и анализ.** При проведении работ по созданию высокопрочных бетонов ключевой задачей является задействование всех возможностей по повышению прочности без увеличения расхода цемента (предпочтительно – его снижение). Это должно способствовать улучшению экономичности и минимизации различных негативных явлений, сопровождающих процесс гидратации, и в конечном счете – повышению эффективности использования дорогостоящей клинкерной составляющей.

Для повышения прочностных показателей при проведении экспериментов были опробованы подходы, хорошо зарекомендовавшие себя по данным литературных источников и в ходе собственных исследований:

- введение тонкомолотых карбонатных наполнителей;
- введение минеральных добавок [2];
- варьирование содержания мелкого заполнителя.

В качестве карбонатного наполнителя был выбран тонкомолотый мраморный порошок (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Влияние тонкомолотого мрамора на прочностные показатели цементного камня

№ состава	Расход наполнителя, % от массы цемента	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг	Н/Г	Прочность, МПа		
				7-е сутки	14-е сутки	28-е сутки
1	2	3	4	5	6	7
1	-	-	24	76	77	77
2	3	700		102	103	104
3	5			112	113	114
4	7			92	93	94
5	10			86	87	88

1	2	3	4	5	6	7
6	3	900		104	105	106
7	5			113	116	118
8	7			101	108	112
9	10			90	98	106

При введении в цемент тонкомолотого мрамора в количестве 3–5 % уже на 7-е сутки отмечается увеличение прочности на 34–49 % что, согласно данным [3], может быть объяснено ускорением гидратации  $C_3S$  в ранние сроки твердения, в том числе за счёт образования центров кристаллизации в виде гидрокарбоната кальция. В более поздние сроки набор прочности замедляется, однако общий прирост прочности в марочном возрасте в конечном счете составляет 35–53 %. При дальнейшем увеличении количества добавки происходит снижение прочности на 20 %. Несмотря на это, прочность состава с 7 % тонкомолотого мрамора выше контрольного состава более чем на 20 % при соответствующем снижении количества клинкерной составляющей.

Изменение удельной поверхности мраморного порошка в рассмотренном диапазоне (с 700 до 900  $m^2/kg$ ) достаточно слабо влияет на изменение прочности, разница показателей не превышает 1–4 %.

Таким образом, применение тонкомолотого мраморного порошка при соответствующем снижении клинкерной составляющей является целесообразным при введении его до 10 %.

Переход на композиционное вяжущее хорошо зарекомендовал себя, что отражено в работах иностранных [4] и отечественных [5, 6] специалистов, в частности ученых БГТУ им. В.Г. Шухова [7, 9]; поэтому следующим этапом было получение композиционного вяжущего для самоуплотняющихся смесей. В качестве тонкодисперсных наполнителей использовали вторичные продукты строительства, полученные из керамического кирпича (КК), лома тяжелого бетона (ТБ) и газосиликата (ГС). Доля данных наполнителей в составе вяжущего была принята 30 %.

Важным аспектом получения композиционных вяжущих с подобными добавками является достижение удельной поверхности не менее 350–400  $m^2/kg$ ; это позволяет восстановить вяжущие свойства негидратированных составляющих цементного камня, содержащихся в выбранных наполнителях, а также снижает пористость их частиц. Указанные добавки обладают различной реологической активностью, что также представляет интерес при проектировании самоуплотняющихся бетонов.

В качестве контрольного образца был принят состав на композиционном вяжущем с 30 % тонкомолотого кварцевого песка КВ70 (КП).

Согласно полученным данным (табл. 2), состав КВ70(ТБ) имеет прочность, большую на 10 % в раннем возрасте и на 26 % в марочном, чем контрольный состав. На наш взгляд, это обуславливается содержанием в минеральной добавке некоторого количества негидратированного клинкерного вещества, которое, вступая в реакцию с водой, ведет к увеличению прочности в ранний период. Наличие у добавки пуццолановой активности способствует образованию дополнительных гидросиликатов кальция; данный эффект проявляется в более поздние сроки твердения.

Т а б л и ц а 2

Прочностные характеристики композиционных вяжущих для самоуплотняющихся бетонных смесей

№	Состав			В/В	Плотность, $kg/m^3$	Прочность, МПа		
	Вяжущее	Вяз.Песок	ГП*, %			5 сут	14 сут	28 сут
1	КВ70(КП) – контрольный	1:1	3	0,2	2463	112	106	129
2	КВ70(ГС)			2	2416	101	119	109
3	КВ70(КК)			2550	106	115	114	
4	КВ70(ТБ)			0,2	2463	123	123	162

\* Раствор пластификатора с концентрацией производителя

Камень на основе вяжущего КВ70(ГС) имеет наименьшие из рассмотренных плотность и прочность, связанные с большим водовязущим отношением, необходимым для получения равноподвижной смеси. Кроме того, имеет место снижение прочности на 28-е сутки, что может служить признаком возникновения внутренних напряжений, ослабляющих камень. Вероятной причиной является присутствие повышенного количества сульфатов и алюминатов, используемых в технологии ячеистых бетонов для поризации и стабилизации реологии смесей, инициирующих процессы, аналогичные сульфатной коррозии.

Вязущее с добавлением тонкомолотого керамического кирпича при таком же водовязущем отношении ( $V/V=0,22$ ) имеет более высокую плотность и сопоставимую прочность без спада в марочном возрасте, тем не менее ощутимо уступает по прочности составам 1 и 4 (на 13–42 %), что, на наш взгляд, связано с его общей меньшей активностью.

Таким образом, для получения композиционных вяжущих для СУБ смесей целесообразно использовать минеральные добавки на основе боя тяжёлого бетона или керамического кирпича. С точки зрения максимальных прочностных показателей, с учётом доступности и высокой размолоспособности, для дальнейших исследований наибольший интерес представляет добавка ТБ. Добавка на основе керамического кирпича может представлять потенциальный интерес как внутренний накопитель влаги для поддержания гидратации ввиду специфической пористости её частиц [10]. Однако водное твердение образцов, принятое в работе, не даёт возможности проявиться данному эффекту.

На следующем этапе было изучено влияние добавки тонкомолотого тяжёлого бетона и мраморного порошка как продуктов, представляющих наибольший интерес с точки зрения повышения прочностных показателей, на реологию смесей. Для оценки влияния гиперпластифицирующей добавки на вязкость (рис. 1, а, б) и прочность (рис. 1, в) были рассмотрены составы без песка при одинаковом  $V/V=0,2$ .

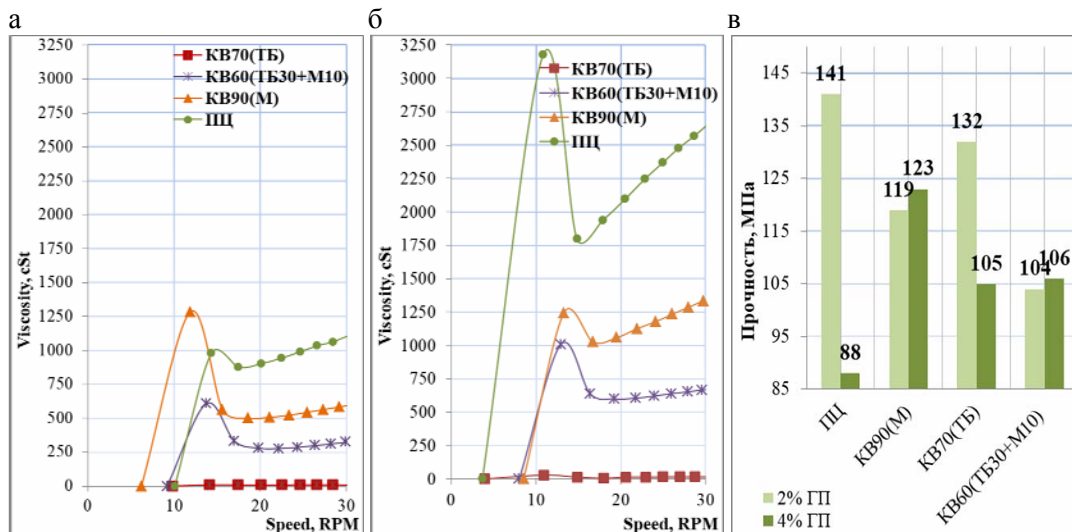


Рис. 1. Вязкость цементного теста при  $V/V=0,2$ :  
а – 2 % ГП; б – 4 % ГП; в – прочностные характеристики составов

При анализе реологических кривых рассматривались два параметра – первый пик на реологической кривой, соответствующий пределу текучести, и угол наклона основной части реограммы, характеризующий динамическую вязкость. Как видно из графиков (см. рис. 1, а, б), увеличение количества гиперпластификатора до 4 % в большинстве случаев приводит к эффекту повышения вязкости. На наш взгляд, это обусловлено тем, что при дозировке 4 % от массы вяжущего добавка, по своей природе являющаяся достаточно вязкой субстанцией, составляет примерно пятую часть от количества вводимой воды и ощутимо загущает смесь. Поэтому применитель-

но к рассматриваемой системе целесообразно ограничить верхний уровень вводимого пластификатора количеством 3 % от массы вяжущего (ориентировочно 1 % в пересчёте на сухое вещество), что также подтверждается прочностными показателями составов (см. рис. 1, в). Повышенное количество гиперпластификатора в большинстве случаев негативно сказывается на прочности, при этом резерв её повышения за счёт снижения В/В отсутствует.

При нижнем уровне варьирования дозировки пластификатора наименьшую вязкость демонстрирует состав на КВ70(ТБ), являющийся одновременно лидером по прочности, уступающим только контрольному составу, применение которого на практике не рационально ввиду крайне низкой размолоспособности песка.

Введение в композиционное вяжущее 10 % тонкомолотого мрамора взамен соответствующей части клинкерной составляющей неоднозначно влияет на вязкость смесей. Для состава, содержащего ТБ, преобладает эффект повышения водопотребности над реологическими свойствами карбонатных порошков – вязкость повышается. Для чистого цемента – наоборот. Тем не менее во всех случаях положительным моментом является повышение стойкости к расслоению составов – отсутствие выделения воды на поверхности образцов после формования.

Снижение прочности камня, сопровождающее введение мраморного порошка, численно превышает сокращение расхода клинкерной части, что делает целесообразным применение данной добавки благодаря ее доступности как отхода обработки природного мрамора. Целенаправленное её получение для использования в данной системе не целесообразно, поскольку не даёт ожидаемых результатов, достаточно часто описываемых в литературе.

Для оптимизации расхода вяжущего было изучено влияние соотношения цементного клея и заполнителя на прочность (рис. 2, а). Согласно полученным данным, наибольшую прочность во всех возрастах имеет состав с соотношением 1:1. При увеличении в смеси доли песка (1:1,3 и 1:1,5) прочность уменьшается на 30–35 %, при дальнейшем увеличении (1:1,7) прочность дополнительно уменьшается на 19 % в марочном возрасте. Снижение прочности обусловлено постепенным увеличением площади контактной зоны камня с заполнителем, являющимся слабым местом системы. На микрофотографии (рис. 2,б) хорошо заметны зоны отрыва цементного камня от мелкого заполнителя в виде лунок или частично обнажённые зерна песка.

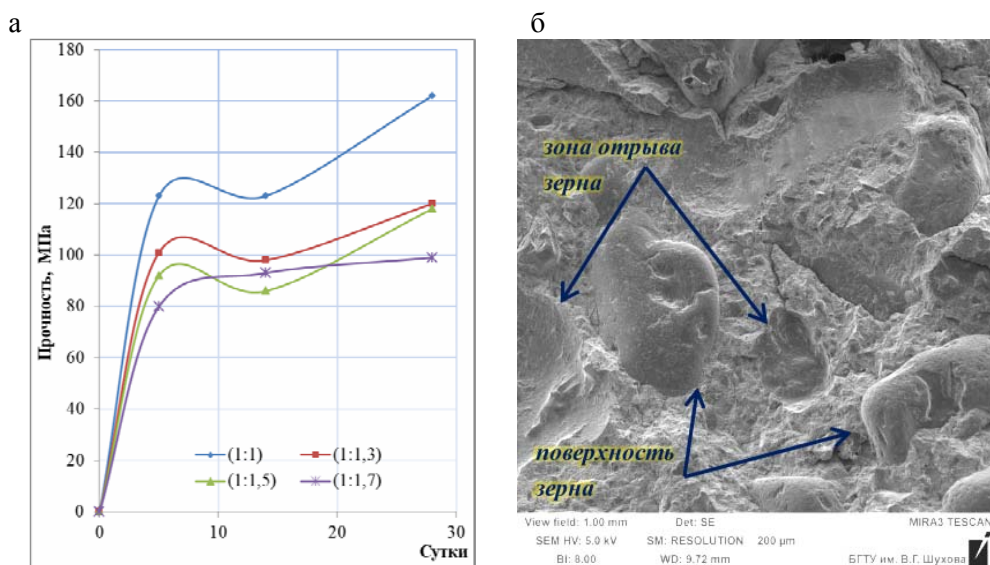


Рис. 2. а – влияние доли мелкого заполнителя на прочность; б – микроструктура камня на основе КВ70(ТБ) с мелким заполнителем (размер видимого поля 1 мм)

Эффект самоуплотнения проявляется в достаточной степени вплоть до соотношения 1:1,5. При дальнейшем увеличении соотношения замечается снижение эффекта



самоуплотнения, сопровождающееся падением прочности в сравнении с составом 1:1 на 64 %.

Как уже отмечалось ранее, существенной проблемой высокопрочных бетонов является их повышенная стоимость, обусловленная в том числе высоким расходом клинкерной составляющей. Поскольку в данной работе в качестве задачи не ставилось получение бетонов с определёнными прочностными показателями, а все рассмотренные способы влияния на прочность имеют разновеликое одновременное влияние как на прочность, так и на расход клинкерной части, то большой практический интерес представляет сквозное сравнение всех составов. В качестве критерия сравнения была принята величина прочности, обеспечиваемой 1 % клинкерной составляющей (КС) от общей массы твёрдых компонентов (удельная прочность, МПа/1 % КС), что позволило отобрать наиболее эффективные решения для разных прочностных групп (классов) (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Физико-механические свойства разработанных составов  
и эффективность использования клинкерной составляющей

№ состава	Состав		Тонкомолотый карбонатный наполнитель, % от массы вяжущего	В/В	Соотношение Вяж:Песок	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на 28-е сутки, МПа	Класс по прочности	Доля клинкерной составляющей, %	МПа / 1 % КС	
	Вяжущее	ГП, %									
1	КВ70 (ТБ)	3	-	0,2	(1:1)	2441	162	В120	30,1	5,4	
2			10			2478	113	В85	27,1	4,2	
3			-			(1:1,3)	2469	120	В90	25,9	4,6
4			-			(1:1,5)	2443	118	В90	24	4,9
5			-			(1:1,7)	2470	99	В75	22,3	4,4
6	КВ70 (КП)	-	-	0,22	(1:1)	2463	129	В95	30,1	4,3	
7	КВ70 (ГС)					2416	109	В80	30,1	3,6	
8						(1:1,5)	2394	122	В90	24	5,1
9	КВ70 (КК)					(1:1)	2550	114	В85	30,1	3,8
10						(1:1,5)	2451	108	В80	24	4,5
11	ЦЕМ I 42,5Н	-	-	0,5	(1:3)	2086	49	В35	33,3	1,5	
12	ЦЕМ I 42,5Н			0,45		2006	52	В40	33,3	1,6	
13	ЦЕМ I 42,5Н			2179		68	В50	33,3	2,1		

Как видно из табл. 3, показатель удельной прочности составов изменяется в пределах от 3,6 до 5,4 МПа/1 % КС. Наиболее эффективными с точки зрения использования клинкерной составляющей являются составы 1, 4, 8 (>4,9 МПа/1 % КС), различающиеся видом применяемой минеральной добавки, количеством заполнителя, уровнем прочности. К аутсайдерам среди рассмотренных можно отнести составы 7 и 9. Остальные составы демонстрируют средний уровень эффективности использования клинкерной составляющей, и дополнительным обоснованием их практического применения могут служить сопутствующие факторы, например доступность определённого вида сырья, специфика решаемой задачи и т.п.

В целом, для проанализированных составов с уровнем прочности 110–120 МПа, что ориентировочно соответствует классу по прочности В80/90 при стандартном коэффициенте вариации, факторами, способствующими повышению эффективности высокопрочных СУБ, являются:

– соотношение вяжущего к заполнителю 1:1,5, обеспечивающее способность к эффективному самоуплотнению и высоким прочностным показателям;

– равноэффективное использование в качестве минеральных добавок отходов дробления тяжёлого бетона, газосиликата и керамического кирпича при их доле 30 % от массы вяжущего.

Для получения более высокопрочных СУБ с прочностью более 130–150 МПа (В100/110) целесообразны снижение соотношения вяжущего к песку до 1:1 (уменьшение площади контактной зоны с заполнителем) и использование композиционных вяжущих с добавкой отходов дробления тяжёлого бетона или кварцевого песка. Однако, как уже упоминалось ранее, последняя добавка малоприменима к практическому использованию ввиду низкой размалываемости.

Предложенная методика сравнения разнопрочных составов, безусловно, учитывает далеко не всю гамму факторов, однако позволяет достаточно просто и наглядно проводить оценку влияния исследуемых факторов. Согласно полученным данным, большое значение имеет не только расход клинкерной составляющей, но и в первую очередь полнота его реализации, что можно достичь сбалансированным составом композиционного вяжущего.

**Выводы:** 1. Определено влияние введения в цемент в качестве карбонатной минеральной добавки тонкомолотого мрамора на прочностные характеристики бетона. Установлено, что тонкомолотый мрамор в количестве 3-5 % приводит к увеличению прочности на 35–53 %. Верхний уровень количества введения указанной добавки в исследованную систему, обеспечивающий экономию клинкерной составляющей при допустимом уровне снижения прочности, составляет 10 % .

2. Минеральная добавка в виде тонкомолотого тяжелого бетона содержит в себе негидратированное клинкерное вещество, которое, вступая в реакцию, приводит к увеличению прочности в ранний период, а наличие у добавки пуццолановой активности способствует образованию дополнительных гидросиликатов кальция (данный эффект проявляется в более поздние сроки твердения). Благодаря чему состав КВ70(ТБ) имеет наибольшую прочность 162 МПа.

3. Установлено, что эффект самоуплотнения проявляется в достаточной степени вплоть до соотношения 1:1,5. При дальнейшем увеличении соотношения замечается снижение эффекта самоуплотнения, сопровождающееся падением прочности в сравнении с составом 1:1 на 64 %.

4. Предложена методика оценки и сравнения эффективности составов по удельной прочности, соответствующей 1 % (масс) клинкерной составляющей. Установлено, что высокое количество клинкерной составляющей не является залогом наибольшей прочности. Наибольший эффект от применения клинкерной составляющей имеют составы 1 (5,4 %), 4 (4,9 %) и 8 (5,1 %).

### Список литературы

1. Коровкин, М.О. Опыт и перспективы использования высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов / М.О. Коровкин, А.Р. Янбукова, Н.А. Ерошкина // Современные научные исследования и инновации. – 2017. – № 2. – С. 187–194.

2. Тараканов, О.В. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 47–53.

3. Ермилова, Е.Ю. Исследование влияния добавок карбонатных пород на физико-механические свойства композиционного цемента / Е.Ю. Ермилова, З.А. Камалова, Р.З. Рахимов, А.Г. Хантимиров, Д.А. Габбасов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 4 (38). – С. 351–358.

4. Yarmakovsky, Vacheslav N. The Scientific Basis for the Creation of a Composite Binders Class, Characterized of the Low Heat Conductivity and Low Sorption Activity of Cement Stone / Vacheslav N. Yarmakovsky, Andrey P. Pustovgar // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 111. – P. 864–870.

5. Баялиева, Г.М. Безобжиговые стеновые материалы на основе композиционных вяжущих / Г.М. Баялиева, А.Д. Алтынбекова // *Механика и технологии*. – 2018. – № 3 (61). – С. 128–132.
6. Федюк, Р.С. Композиционные вяжущие для бетонов повышенной ударной стойкости / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2018. – № 4 (200). – С. 85–91.
7. Лесовик, В.С. Композиционное вяжущее с использованием кремнистых пород / В.С. Лесовик, В.В. Строкова, А.Н. Кривенкова, Е.И. Ходыкин // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2009. – № 1. – С. 25–27.
8. Алфимова, Н.И. Влияние генезиса минерального наполнителя на свойства композиционных вяжущих / Н.И. Алфимова, И.В. Жерновский, Е.А. Яковлев, Т.Г. Юракова, Г.А. Лесовик // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2010. – № 1. – С. 91–94.
9. Ахмед, А.А. Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и лёгкого бетона / А.А. Ахмед, Р.С. Федюк, Ю.Л. Лисейцев, Р.А. Тимохин, Г. Мурали // *Строительные материалы и изделия*. – 2020. – Т. 3, № 3. – С. 28–39.
10. Лесовик, В.С. Эффективные кладочные растворы для автоклавных стеновых материалов / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, А.А. Куприна, М.Ю. Елистраткин, А.Н. Володченко // *Строительные материалы*. – 2016. – № 12. – С. 22–25.

#### References

1. Korovkin, M.O. Experience and prospects of using high-strength and ultra-high-strength concrete / M.O. Korovkin, A.R. Yanbekova, N.A. Eroshkina // *Modern scientific research and innovation*. – 2017. – No. 2. – P. 187–194.
2. Tarakanov, O.V. Self-compacting concretes of a new generation on the basis of local raw materials / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // *Regional architecture and engineering*. – 2014. – No. 2. – P. 47–53.
3. Ermilova, E.Yu. Investigation of the influence of carbonate rock additives on the physical and mechanical properties of composite cement / E.Yu. Ermilova, Z.A. Kamalova, R.Z. Rakhimov, A.G. Khantimirov, D.A. Gabbasov // *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2016. – No. 4 (38). – P. 351–358.
4. Yarmakovskiy, Vacheslav N. The Scientific Basis for the Creation of a Composite Class Binders, Characterized of the Low Heat Conductivity and Low Sorption Activity of Cement Stone / Vacheslav N. Yarmakovskiy, P. Pustovgar Andrey // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 111. – P. 864–870.
5. Bayaliev, G.M. Non-fired building materials based on composite binders / G.M. Bayaliev, A.D. Altynbekov // *Mechanics and technology*. – 2018. – No. 3 (61). – P. 128–132.
6. Fedjuk, R.S. Composite binders for concretes of increased impact resistance / R.S. Fedjuk, A.V. Mochalov // *News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*. – 2018. – No. 4 (200). – P. 85–91.
7. Lesovik, V.S. Compositional binder with the use of siliceous rocks / V.S. Lesovik, V.V., Strokov, A.N. Krivenkova, E.I. Khodykin // *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. – 2009. – No. 1. – P. 25–27.
8. Alfimova, N.I. Influence of the genesis of mineral filler on the properties of composite binders / N.I. Alfimova, I.V. Zhernovskiy, E.A. Yakovlev, T.G. Yurakova, G.A. Lesovik // *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. – 2010. – No. 1. – P. 91–94.
9. Ahmed, A.A. Use of Iraqi concrete scrap as a filler and filler of heavy and light concrete / A.A. Ahmed, R.S. Fedjuk, Yu.L. Liseitsev, R.A. Timokhin, G. Murali // *construction materials and products*. – 2020. – Vol. 3, No. 3. – P. 28–39.
10. Lesovik, V.S. Effective masonry solutions for autoclave wall materials / V.S. Lesovik, L.H. Zagorodnyuk, A.A. Kuprina, M.Yu. Elistratkin, A.N. Volodchenko // *Building materials*. – 2016. – No. 12. – P. 22–25.

УДК 691.327:539.4

*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

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

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

*Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)*

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

**Ерофеев Владимир Трофимович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные материалы  
и технологии»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

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

*Ogarev Mordovia State University (MRSU)*

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

**Yerofeev Vladimir Trofymovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Building materials and  
technology»

## РЕГРЕССИОННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ И КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин

На основе проведенных исследований получены уравнения регрессии взаимосвязи параметров качества конструкционной прочности цементного камня, функции которых могут быть использованы как прогностические. Численные значения коэффициентов корреляции математических моделей показывают достаточно тесную связь между исследуемыми параметрами качества конструкционной прочности цементного камня.

*Ключевые слова: прочность, модуль упругости, внутреннее трение, акустическая эмиссия, условный критический коэффициент интенсивности напряжений, коэффициент корреляции, математическая модель*

## REGRESSION RELATIONSHIPS BETWEEN PARAMETERS OF STRUCTURE QUALITY AND STRUCTURAL STRENGTH OF CEMENT STONE

I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin

Based on the research, regression equations for the relationship between the parameters of the quality of structural strength of cement stone are obtained, the functions of which can be used as predictive ones. Numerical values of the correlation coefficients of mathematical models show a fairly close relationship between the studied parameters of the quality of structural strength of cement stone.

*Keywords: strength, modulus of elasticity, internal friction, acoustic emission, conditional critical stress intensity coefficient, correlation coefficient, mathematical model*

Создание конструкционных строительных материалов (КСМ) с определенными свойствами является важнейшей задачей современной науки о материалах [1, 2], в основу решения которой положены описание связей эффективных свойств КСМ разных типов с характеристиками компонентов, которые можно получить только экспериментальным путем, и анализ особенностей механического поведения композитов как с позиций механики деформирования сплошной среды, так и с позиций структурной механики разрушения материалов [3].

Ранее в работе [4] были приведены результаты наших комплексных экспериментальных исследований оценки качества параметров структуры и механического поведения цементного камня с водоцементным отношением от нормальной густоты до максимальной водоудерживающей способности цементного теста в возрастном диапазоне от трех до 90 суток с получением регрессионных зависимостей основных конструктивных свойств цементного камня в достаточно широком диапазоне его плотности и возраста с учетом особенностей технологии изготовления и лабораторного хранения опытных образцов.

Методологическая особенность комплексного исследования (оценки) качества параметров конструкционной прочности цементного камня заключалась в том, что для их получения использовали как неразрушающий метод испытания для оценки коэффициента внутреннего трения  $K_{ВТ}$  и динамического модуля упругости  $E_d$  цементного камня с помощью прибора ИКВТ-2, так и методику ГОСТ 29167 для неравновесных механических испытаний образцов типа I для определения в совокупности характеристик трещиностойкости: прочности на сжатие  $R_{сж}$ , прочности на растяжение при изгибе  $R_{биф}$ , условного критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_c^*$  и энергии акустической эмиссии при разрушении  $\mathcal{E}_{АЭ}$ , – на каждом опытном образце сравниваемых серий в принятые контрольные сроки испытаний, что позволило впервые получить обширный экспериментальный материал (см. таблицу) для обобщения, прогнозирования и получения математических моделей взаимосвязи между основными параметрами качества конструкционной прочности цементного камня, что являлось целью данной работы.

Численные значения параметров качества цементного камня

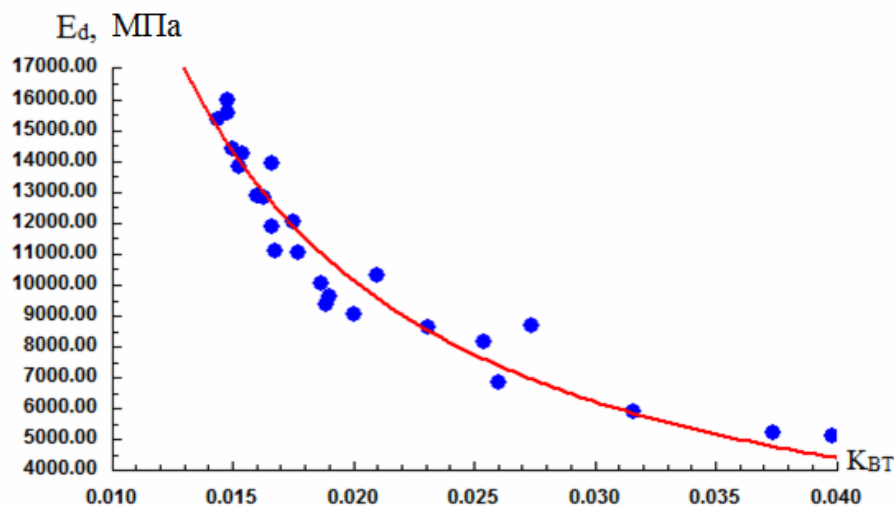
Возраст цементного камня, сут	Параметры качества цементного камня						$\mathcal{E}_{АЭ}$ , В <sup>2</sup> ·см <sup>-2</sup>
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}$ , МПа	$R_{биф}$ , МПа	$E_d$ , МПа	$K_c^*$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$K_{ВТ}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
В/Ц = 0,27							
1	2030	-	-	-	-	-	-
3	2060	41,1	3,67	8680	0,360	0,0274	0,08
14	2060	70,9	4,94	13930	0,485	0,0166	0,15
28	2070	80,4	5,57	15340	0,547	0,0144	0,175
60	2080	86,3	6,43	15550	0,632	0,0148	0,12
90	2090	91,2	5,55	15970	0,545	0,0148	0,11
В/Ц = 0,32							
1	1990	-	-	-	-	-	-
3	2010	27,8	2,8	6850	0,275	0,0260	0,06
14	2016	53,9	3,9	12070	0,384	0,0175	0,145
28	2023	74,4	4,87	13850	0,478	0,0153	0,15
60	2025	77,9	5,47	14390	0,537	0,0150	0,12
90	2030	84,2	4,8	14260	0,471	0,0154	0,11
В/Ц = 0,37							
1	1920	-	-	-	-	-	-
3	1930	19,5	2,17	5900	0,213	0,0316	0,04
14	1960	39,6	3,74	10340	0,367	0,0210	0,134
28	1960	57,0	3,99	11890	0,391	0,0166	0,14

1	2	3	4	5	6	7	8
60	1965	64,4	4,38	12900	0,430	0,0160	0,12
90	1970	67,0	4,12	12850	0,405	0,0163	0,11
В/Ц = 0,42							
1	1810	-	-	-	-	-	-
3	1840	16,9	1,58	5240	0,155	0,0374	0,040
14	1860	33,6	2,92	8620	0,287	0,0231	0,120
28	1860	45,9	3,28	10050	0,309	0,0187	0,130
60	1870	52,3	3,67	11040	0,360	0,0177	0,1
90	1875	56,4	3,6	11110	0,354	0,0168	0,08
В/Ц = 0,47							
1	1770	-	-	-	-	-	-
3	1790	15,5	1,48	5110	0,145	0,0398	0,035
14	1810	31,2	2,83	8170	0,278	0,0254	0,06
28	1810	36,5	3,1	9040	0,305	0,0200	0,06
60	1810	41,8	3,18	9390	0,312	0,0189	0,05
90	1815	45,2	3,1	9650	0,305	0,0190	0,04

В каждый контрольный срок возраста цементного камня испытывали по шесть опытных образцов каждой серии, средние численные значения параметров качества цементного камня приведены в таблице.

Компьютерно-математическая обработка результатов эксперимента позволила *впервые* получить уравнения регрессии взаимосвязи названных выше параметров качества цементного камня, установить значения эмпирических коэффициентов уравнений взаимосвязи между параметрами в диапазоне времени от трех до 90 суток возраста цементного камня и численные значения коэффициентов корреляции для уравнений регрессии.

Из анализа численных значений коэффициента корреляции математических моделей, приведенных на рис. 1–6, следует, что между рассматриваемыми величинами наблюдается достаточно тесная связь, функции полученных моделей могут быть использованы, с одной стороны, как прогностические, а с другой стороны, – как расчетные параметры конструкционной прочности цементного камня (клея) при проектировании его состава в достаточно широком диапазоне его плотности и возраста.



Математическая модель:	Коэффициенты:
Power Fit	$S = 895,163$
$E_d = a \times K_{вт}^b$	$r = 0,963$
	$a = 93,346$
	$b = -1,198$

Рис. 1. Графическая и математическая модели взаимосвязи динамического модуля упругости и коэффициента внутреннего трения цементного камня

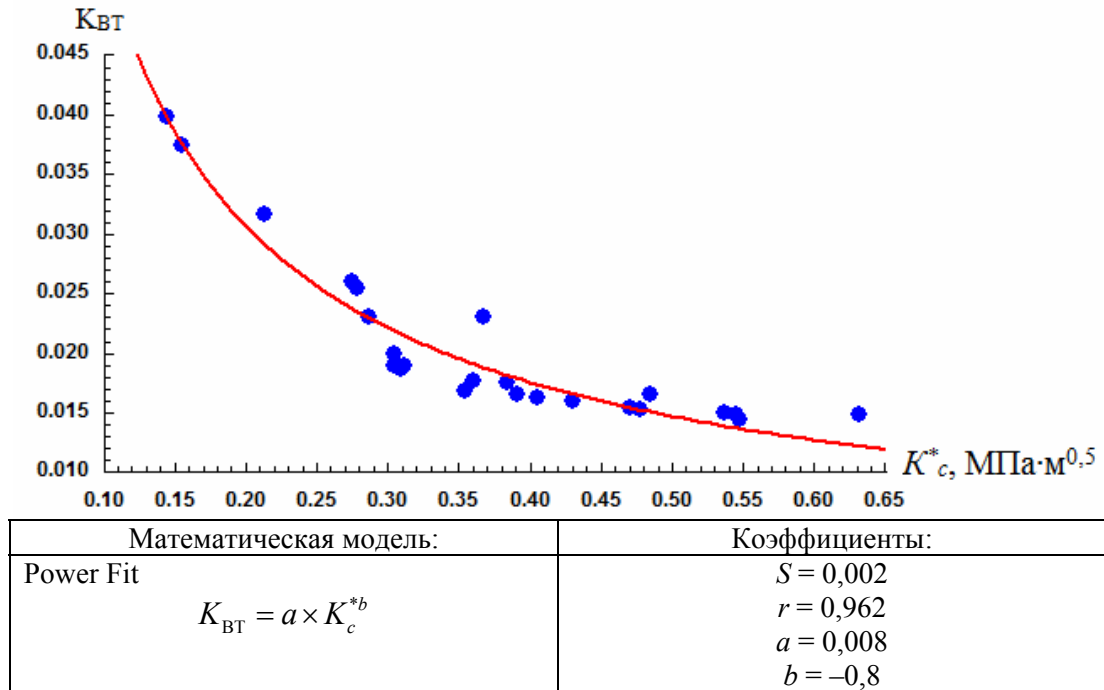


Рис. 2. Графическая и математическая модели взаимосвязи коэффициента внутреннего трения и условного критического коэффициента интенсивности напряжений цементного камня

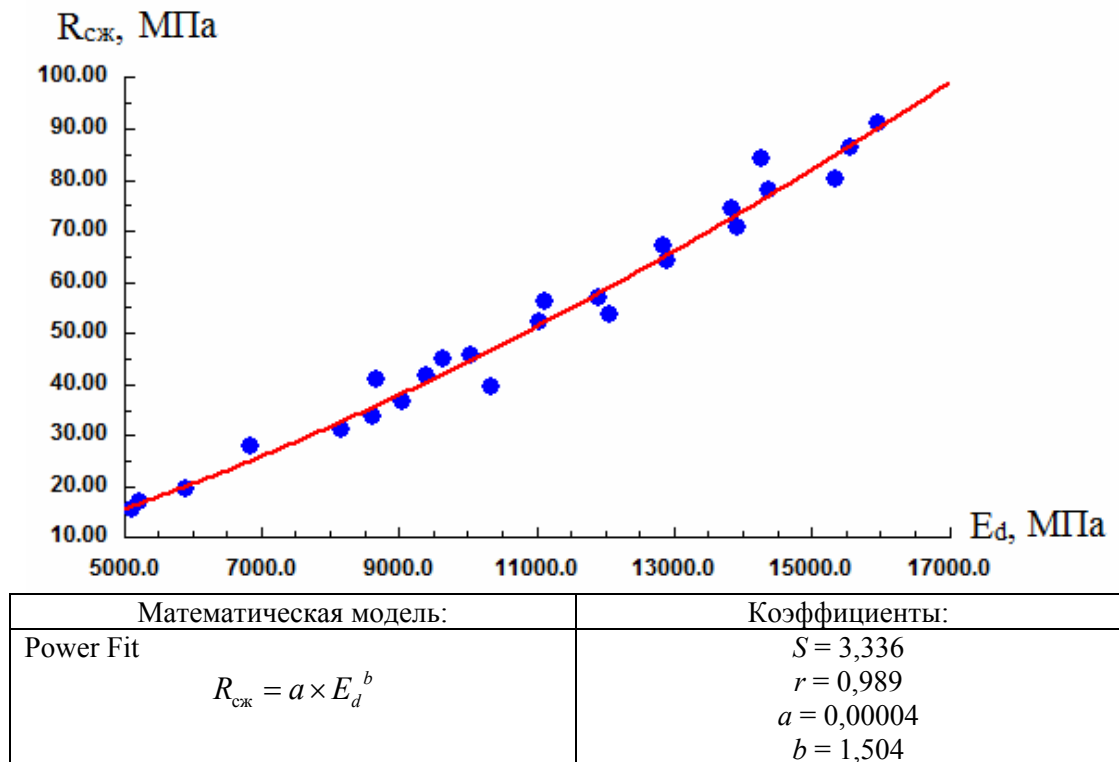


Рис. 3. Графическая и математическая модели взаимосвязи прочности на сжатие и динамического модуля упругости цементного камня

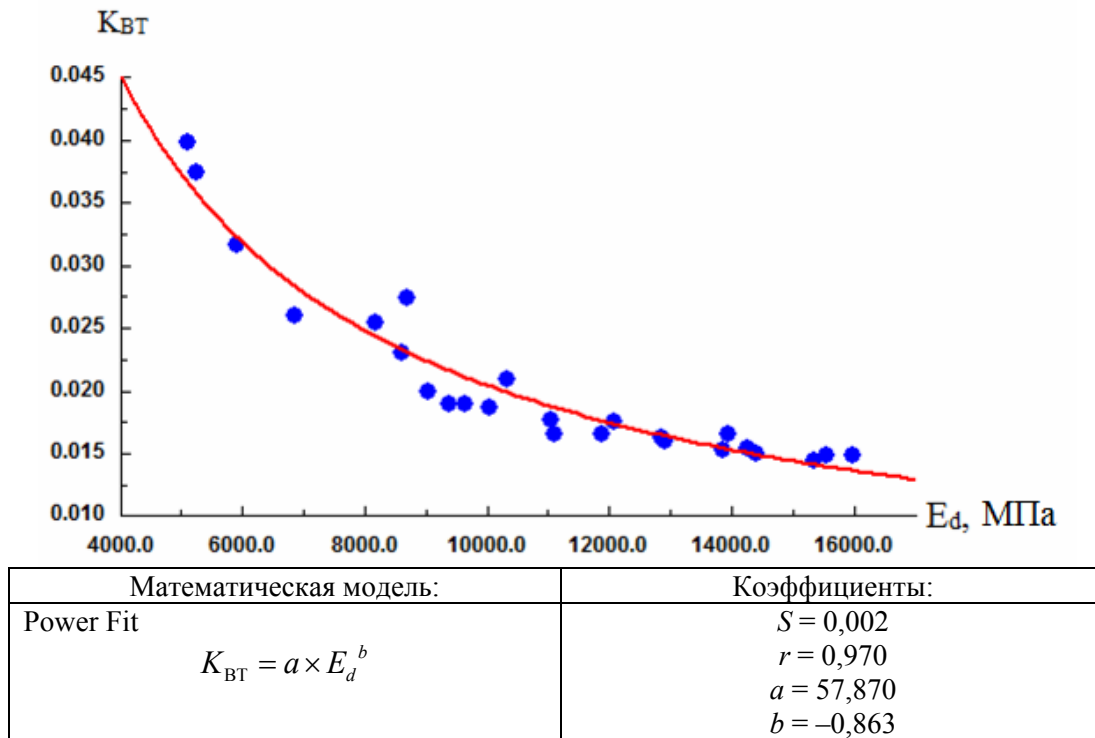


Рис. 4. Графическая и математическая модели взаимосвязи коэффициента внутреннего трения и динамического модуля упругости цементного камня

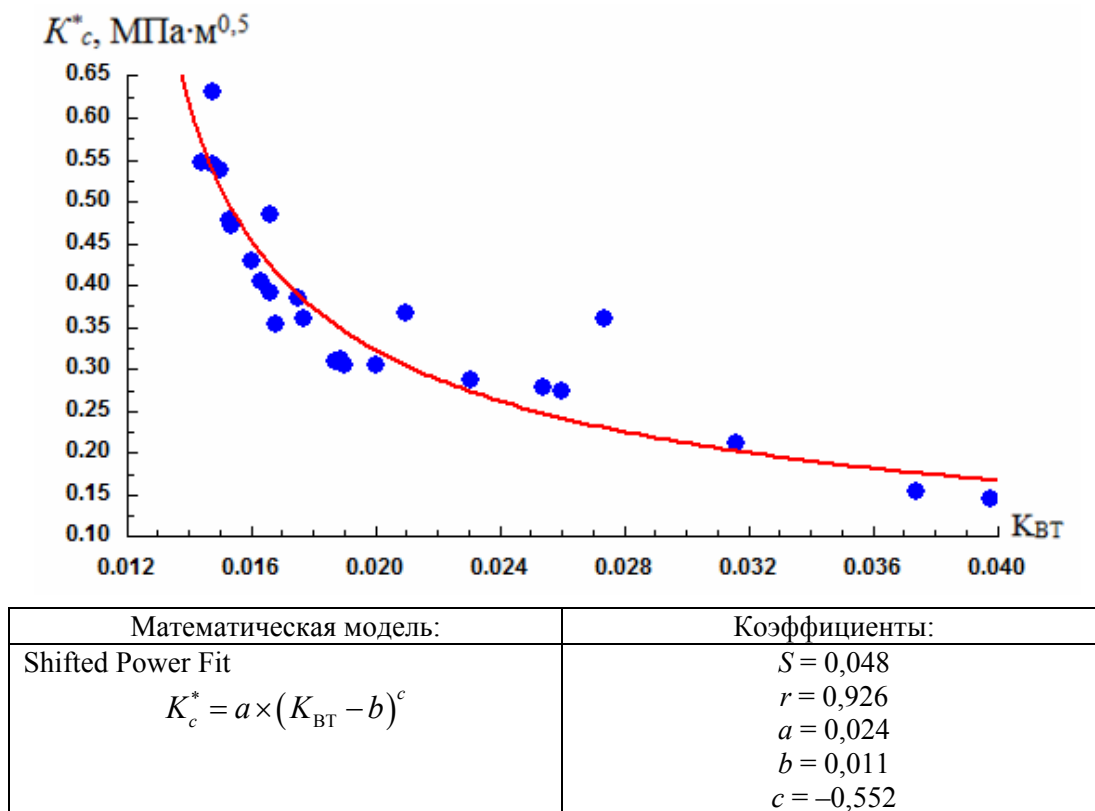


Рис. 5. Графическая и математическая модели взаимосвязи условного критического коэффициента интенсивности напряжений и коэффициента внутреннего трения цементного камня



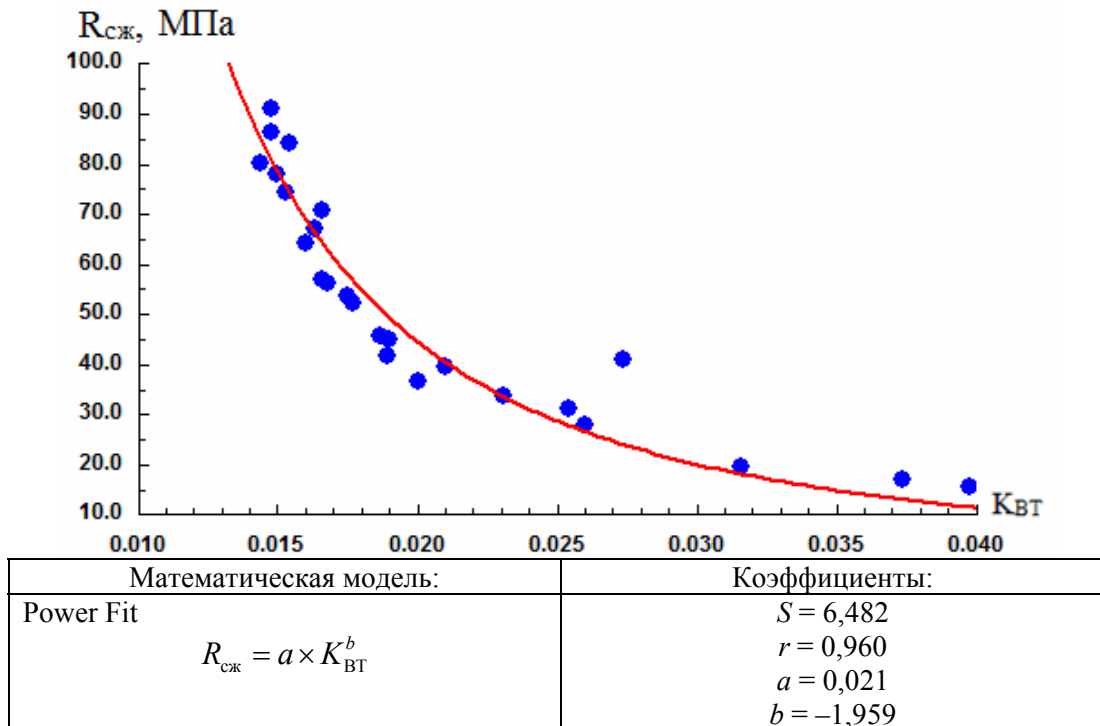


Рис. 6. Графическая и математическая модели взаимосвязи прочности на сжатие и коэффициента внутреннего трения цементного камня

Использованный в исследовании методологический комплексный подход к оценке параметров качества конструкционной прочности цементного камня с помощью неразрушающего метода оценки внутреннего трения и динамического модуля упругости, изучение акустической эмиссии на диаграмме нагружения опытных образцов и совокупности характеристик трещиностойкости с позиций структурной механики разрушения материалов открывают новые экспериментальные возможности понимания процессов разрушения и параметров трещиностойкости и, на этой основе, совершенствования структуры цементного камня (клея) и осуществления рецептурно-технологической оптимизации его дисперсно-кристаллитной структуры.

Таким образом, методологическая особенность исследования (оценки) на каждом опытном образце совокупности параметров качества структуры и конструкционной прочности сравниваемых серий цементного камня в контрольные сроки раннего структурообразования и твердения за счет совместного использования неразрушающих (с помощью прибора ИКВТ-2) и разрушающих методов испытания образцов по методике ГОСТ 29167–91 и ГОСТ 310.4-81 позволила получить обширный экспериментальный материал для системно-структурного анализа, обобщения и прогнозирования, а программно-компьютерная обработка результатов этих исследований позволила *впервые* получить вероятностно-статистические математические модели взаимосвязи (соотношения) основных параметров качества структуры и конструкционной прочности цементного камня сравниваемых серий в достаточно широком интервале его плотности (В/Ц) и возраста. Как отмечено выше, эти соотношения могут быть использованы как прогностические, так и расчетные для параметров конструкционной прочности матричной фазы (клея) цементных композитов при проектировании их состава, а разработка и использование соответствующих методик исследования материалов являются основными предпосылками эффективной и действенной программы оценки свойств материалов и дальнейшего улучшения понимания этих свойств.

## Список литературы

1. Акчурин, Т.К. Теоретические и методологические определения характеристик трещиностойкости бетона при статическом нагружении / Т.К. Акчурин, А.В. Ушаков. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2005. – 408 с.
2. Пирадов, К.А. Механика разрушения и теория железобетона / К.А. Пирадов, Н.В. Савицкий // Бетон и железобетон. – 2014. – № 4. – С. 23–25.
3. Максимова, И.Н. Методологические аспекты комплексной оценки механического поведения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.В. Полубарова // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1 (22). – С. 28–33.
4. Максимова, И.Н. Регрессионные зависимости основных свойств цементного камня при изменении его структуры и возраста / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Е.А. Тамбовцева // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 2 (23). – С. 37–44.

## References

1. Akchurin, T.K. Theoretical and methodological definitions of the characteristics of crack resistance of concrete under static loading / T.K. Akchurin, A.V. Ushakov. – Volgograd: VolgGASU, 2005. – 408 p.
2. Piradov, K.A. Fracture mechanics and the theory of reinforced concrete / K.A. Piradov, N.V. Savitsky // Beton i zhelezobeton. – 2014. – No. 4. – P. 23–25.
3. Maksimova, I.N. Methodological aspects of the integrated assessment modelling the mechanical behavior of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Ju.V. Polubarova // Regional architecture and engineering. – 2015. – No. 1 (22). – P. 28–33.
4. Maksimova, I.N. Regression dependences of the main properties of cement stone when changing its structure and age / I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin, E.A. Tambovtseva // Regional architecture and engineering. – 2015. – No. 2 (23). – P. 37–44.

УДК 691.327:539.4

*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

**Макридин Николай Иванович**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
**Максимова Ирина Николаевна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: maksimovain@mail.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Makridin Nikolai Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Technology of Building Materials  
and Woodworking»  
**Maksimova Irina Nikolaevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Quality Management and  
Construction Technologies»  
E-mail: maksimovain@mail.ru

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АМОРФНОЙ ФАЗЫ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Для керамзитового гравия с оптимальными физико-механическими свойствами для легких бетонов повышенной прочности выявлено соотношение кристаллической и аморфной фаз для гравия с насыпной плотностью 500 кг/м<sup>3</sup> и более, которое изменяется в пределах от 15–20 до 40–60 %. Оптимальным с точки зрения получения керамзитового заполнителя высокой прочности можно считать содержание стекловидной фазы по объему 35–45 %. Показано, что оксид кремния в расплаве и стекле существует в форме тетраэдров, которые в зависимости от того, в каком количестве находятся в стекле компоненты одновалентных и двухвалентных металлов, обладают разными свойствами, поскольку мостиковый (двухсвязанный) кислород отличается по свойствам от немостикового (односвязанного). Мерой степени связанности служит коэффициент, равный отношению числа атомов кремния к числу атомов кислорода.

*Ключевые слова: пористые заполнители, аморфная фаза, структура, стеклообразное состояние, аморфизованные дисперсии, кислородное число*

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE AMORPHOUS PHASE OF POROUS AGGREGATES

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

For expanded clay gravel with optimal physical and mechanical properties used for lightweight concrete of increased strength, the ratio of crystalline and amorphous phases for gravel with a bulk density of 500 kg/m<sup>3</sup> or more, which varies from 15–20 to 40–60 %, has been revealed. Optimal from the point of view of obtaining high strength expanded clay aggregate can be considered the content of the vitreous phase by volume 35–45 %. It is shown that silicon oxide in melt and glass exists in the form of tetrahedra, which, depending on the amount of components of monovalent and divalent metals in the glass, have different properties, since bridged (doubly bound) oxygen differs in properties from non-bridged (singly bound). A measure of the degree of bonding is the coefficient equal to the ratio of the number of silicon atoms to the number of oxygen atoms.

*Keywords: porous aggregates, amorphous phase, structure, glassy state, amorphous dispersions, oxygen number*

Аморфная фаза является одним из физических состояний твердых тел и характеризуется двумя особенностями: свойства таких веществ при обычных условиях не зависят от выбранного направления, т.е. они изотропны; при повышении температуры происходят размягчение аморфного вещества и постепенный переход его в жидкое состояние. Точное значение температуры плавления не установлено.

Общим для кристаллического и аморфного состояний веществ является отсутствие поступательного перемещения частиц и сохранение только их колебательного движения около положения равновесия. Различие между ними состоит в наличии геометрически правильной решетки у кристаллов и отсутствии дальнего порядка в расположении атомов у аморфных веществ.

Аморфное состояние вещества по сравнению с кристаллическим всегда менее устойчиво и обладает избыточным запасом внутренней энергии. В связи с этим при определенных условиях самопроизвольно осуществляется переход из аморфного состояния в кристаллическое.

Твердые тела в аморфном состоянии можно получить двумя путями. Первый – быстрое охлаждение расплавов кристаллических веществ, преимущественно ионного и ковалентного строения. Типичные представители таких аморфных тел – силикатные стекла, битумы, смолы и пр. Второй – диспергация кристаллических структур, в результате чего образуются аморфизованные дисперсии в виде коллоидов и растворов. Разрушаясь или конденсируясь, дисперсии изменяют свое агрегатное состояние. Пересыщенные растворы, например, могут превратиться в гель и образовать полимер или кристаллизоваться.

Основной разновидностью аморфного состояния вещества является стеклообразное, которое занимает как бы промежуточное положение между кристаллическим и жидким. Упругость формы делает стекло сходным с кристаллическими телами, отсутствие симметрии в структуре, изотропность – с жидкостью.

Многие природные и искусственные каменные материалы в своем составе содержат и кристаллическую, и стекловидную фазы. Соотношение между объемами кристаллической и стекловидной фаз, а также их взаимное расположение оказывают огромное влияние на свойства материалов, имеющих такую структуру. Типичными представителями подобных материалов являются пористые заполнители, ситаллы, фарфор и другие керамические материалы.

В легких пористых заполнителях (насыпной плотностью менее  $300 \text{ кг/м}^3$ ) содержание стекловидной фазы составляет 85–98 %. Получить легкие заполнители с меньшим содержанием стеклофазы невозможно. В заполнителях с насыпной плотностью  $500 \text{ кг/м}^3$  и более стекловидная фаза также присутствует, но ее роль в формировании требуемой структуры несколько иная. Остановимся на этом более подробно.

Соотношение кристаллической и стекловидной фаз оказывает большое влияние на физико-технические свойства заполнителей. Распределяясь между кристаллами и зернами минералов в виде тончайших пленок, стекловидная фаза обеспечивает их прочную связь и высокие физико-технические свойства. Количество стекловидной фазы у заполнителей указанной плотности изменяется в широких пределах: от 15–20 до 40–60 %. Излишек стекловидной фазы, как и ее недостаток, снижает прочность и термостойкость заполнителей. Оптимальным по объему с точки зрения получения заполнителей высокой прочности можно считать содержание стекловидной фазы 35–45 % [1, 2].

Стекловидная фаза не только является связующей для остальных нестекловидных компонентов черепка, она участвует в процессах образования новых кристаллических фаз при обжиге и охлаждении заполнителей. Различают два вида кристаллизации стекла: неравномерную, происходящую только на поверхности либо в отдельных случайных точках объема, и равномерную, происходящую одновременно во всем объеме при наличии громадного числа предзародышевых центров (порядка  $10^{12}$  и более в каждом случае). Второй вид кристаллизации ведет к постепенному перерождению однородного стекла в поликристаллическое микрогетерогенное тело. Такие поликристаллические тела, названные ситаллами или пирокерамами, резко отличаются по свойствам и структуре от исходных стекол. Они получили в настоящее время большое практическое значение. Ситаллы в несколько раз прочнее стекол и имеют высокую устойчивость к температурным перепадам.

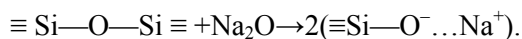
Появление кристалликов в стеклообразующем расплаве чувствительно отражается на вязкости, которая, как правило, при этом резко возрастает с течением времени. В результате развития процесса кристаллизации вязкость размягченных стекол может

возрастать и с повышением температуры. Каждой температуре, лежащей между линиями ликвидуса и солидуса, отвечает своя равновесная структурная вязкость. В общем случае кристаллизационные способности стекол зависят от следующих факторов: степени связности кремнекислородного каркаса, координационного состояния и валентности катионов. Рассмотрим влияние этих факторов более подробно.

Степень связности кремнекислородного каркаса: как известно, оксид  $\text{SiO}_2$  в расплаве и стекле существует в форме тетраэдров  $[\text{SiO}_4]$ , которые в зависимости от того, в каком количестве находятся в стекле компоненты  $\text{Me}_2\text{O}$  и  $\text{MeO}$ , обладают разными свойствами, поскольку мостиковый («двусвязный») кислород отличается по свойствам от немостикового («односвязного»). Другими словами, свойства  $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдров зависят в первую очередь от степени связности кремнекислородного каркаса. Мерой степени связности выступает коэффициент  $f_{\text{Si}}$ , равный отношению числа атомов кремния к числу атомов кислорода,  $f_{\text{Si}} = \text{Si}/\text{O}$ , или обратная величина – кислородное число  $R = \text{O}/\text{Si}$ .

Считают, что чистое кварцевое стекло полностью состоит из тетраэдров, у которых каждая из кислородных вершин является общей для двух соседних тетраэдров. Внутри тетраэдра располагается «молекула»  $\text{SiO}_2$ , состоящая из одного иона кремния и четырех равноотстоящих от  $\text{Si}^{4+}$  половинок двусвязных ионов кислорода. При введении в кварцевое стекло первых порций окислов  $\text{Me}_2\text{O}$  или  $\text{MeO}$  одна вершина у части  $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдров «ослабляется», так как по соседству с некоторыми ионами кислорода с одной стороны оказываются ионы  $\text{Me}^{2+,1+}$ , обладающие более слабым силовым полем, чем  $\text{Si}^{4+}$ . Количество таких тетраэдров возрастает по мере увеличения содержания в стекле окислов  $\text{Me}_2\text{O} + \text{MeO}$ . Скелет стекла, имеющего состав  $(\text{Me}_2\text{O} + \text{MeO}) \cdot 2\text{SiO}_2$ , т.е. содержащего в среднем 67 % молекул  $\text{SiO}_2$ , строится исключительно из тетраэдров с одной «ослабленной» вершиной. Процесс изменения характера кремнекислородного скелета стекла отражается на свойствах  $\text{SiO}_2$  в нем. Введение в кварцевое стекло окислов  $\text{Me}_2\text{O}$  и  $\text{MeO}$  приводит к легкому искажению  $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдров в сторону их уплотнения. Благодаря «ослаблению» одной вершины резко возрастает способность  $[\text{SiO}_4]$  к колебательным движениям.

При дальнейшем добавлении окислов  $\text{Me}_2\text{O}$  и  $\text{MeO}$  к стеклу сверх 33 % «ослабляется» вторая вершина тетраэдров, потом третья и, наконец, четвертая. Описанная картина изменения структуры кремнекислородного каркаса и самого  $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдра при введении в кварцевое стекло окислов одно- и двухвалентных элементов выражает идеализированное, среднее состояние системы, взятой в целом. Изменение степени связности Si–O-каркаса особенно резко сказывается на вязкости стекол и на других зависящих от вязкости свойствах. В системе  $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  вязкость падает на восемь порядков с уменьшением  $f_{\text{Si}}$  от 0,5 до 0,4. Вязкость кремнезема при 1400 °C равна  $10^9$  Па·с, а бисиликата  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  – всего лишь  $2,8 \cdot 10^2$  Па·с. Флюсующее действие окислов объясняется разрывом мостиков Si–O–Si:



Примечание. Символ « $\equiv$ » означает связь Si с тремя атомами кислорода.

От степени связности кремнекислородного каркаса зависят состояние структурного кислорода в стекле, его активность, повышение которой при добавлении к стеклу окислов  $\text{Me}_2\text{O}$  и  $\text{MeO}$  сверх 33 % достаточно резко уменьшает химическую стойкость стекла, резко повышает его растворимость в основаниях и даже в воде.

Координационное состояние катионов принимается в кристаллохимии как главный и руководящий принцип, лежащий в основе теории строения кристаллических силикатов и других ионных соединений. Зависимость их свойств от структуры обуславливается в первую очередь координационными числами катионов относительно ионов кислорода.

Координационные полиэдры, образованные катионами с интенсивным электрическим полем (малый радиус, высокий заряд), являются настолько прочными, что и в стекле сохраняют свою определенность. Таковы полиэдры  $[\text{MeO}_k]$ , где  $\text{Me} = \text{Si}^{4+}, \text{Ti}^{4+}, \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$  и др. Одним из условий образования прочного стеклообразного каркаса

является наличие сильных направленных связей (больше 330 кДж), следовательно, координационное число стеклообразующих катионов должно быть насколько возможно малым.

Вызванное теми или иными причинами изменение координационных чисел катионов, входящих в определенные структурные группы  $[\text{MeO}_k]$ , резко сказывается на свойствах стекла. Один и тот же элемент по-разному окрашивает стекло, придает ему разные химические и другие свойства в зависимости от того, в каком координационном состоянии относительно кислорода он находится.

Экспериментальные данные и результаты структурных исследований дают основание утверждать, что учение о координации и взаимозамещаемости ионов в кристаллических силикатах может быть перенесено в общей форме, но с некоторыми особенностями и на стеклообразное состояние силикатов.

Природа окиси алюминия при вхождении последней в щелочное силикатное стекло претерпевает глубокие изменения. Координационное число алюминия в корунде равно 6, а при вхождении в щелочное стекло координационное число катиона  $\text{Al}^{3+}$ , как правило, снижается с 6 до 4. В присутствии крупных катионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  создаются благоприятные возможности для изоморфного замещения в решетке кристаллических силикатов ионов  $\text{Si}^{4+}$  на ионы  $\text{Al}^{3+}$ . Катионы малого радиуса ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и др.), напротив, препятствуют этому процессу.

Способность алюминия к переходу в стекле из одной координации в другую определяется не только природой компонентов  $\text{MeO}$ , но и соотношением  $(\text{MeO} + \text{Me}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 = \psi_{\text{Al}}$ . Недостающее в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  количество кислорода, необходимое для построения  $[\text{AlO}_4]$ , изоморфных  $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдрам, компенсируется активными окислами  $\text{MeO}$  и  $\text{Me}_2\text{O}$ . К активным  $\text{MeO}$  и  $\text{Me}_2\text{O}$  относятся  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{CaO}$ . Окислы  $\text{BeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$  не способны переводить алюминий в четверную координацию.

Согласно современным представлениям, ионы железа могут:

- замещать группы  $[\text{SiO}_4]$ , т.е. выступать в роли стеклообразователей с координационным числом 4;
- выступать в роли модификаторов, замещая активные  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{CaO}$ ;
- образовывать окислы или щелочные ферриты в коллоидно-дисперсном состоянии и выполнять роль катализаторов кристаллизации.

Большинство исследователей считают, что четверная координация ионов железа и замещение  $[\text{SiO}_4]$  на  $[\text{FeO}_4]$  возможны до тех пор, пока недостающее в системе  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  количество кислорода, необходимое для построения  $[\text{FeO}_4]$ , компенсируется активными окислами  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{CaO}$ . В случае недостатка  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{CaO}$  ион железа приобретает шестерную координацию.

Таким образом, строение силикатных алюминий- и железосодержащих стекол в связи с двойственным положением в них как ионов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$ , так и ионов  $\text{Al}^{3+}$  представляется достаточно сложным. Координационное состояние ионов железа и алюминия зависит от содержания в стекле оксидов щелочей. При отношении  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) < 1$  ионы железа связываются в тетраэдрические комплексы, которые равноценны алюминий-тетраэдрическим комплексам и поэтому могут «соосаждаться» вместе. Если  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) \geq 1$  ионы алюминия прочно связывают немостиковые ионы кислорода, ионы железа переходят в положение модификаторов, что сопровождается изменением некоторых свойств железосодержащих стекол: повышается электропроводность, появляется электромагнетизм. В тех случаях, когда  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) \gg 1$ , не только ионы железа, но и ионы алюминия переходят в шестерную координацию, и в стекле возникают смешанные группировки  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  в октаэдрическом положении, которые при последующей термической обработке дают начало различным кристаллическим соединениям.

Вопросам кристаллизации железосодержащих стекол посвящено достаточно большое количество исследований [3, 4, 5]. Несмотря на имеющиеся противоречия относительно влияния концентрации двух- и трехвалентного железа на характер кристаллизации стекол, большинство авторов отмечают ведущую роль ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в форми-

ровании кристаллической структуры стекла. Отмечается, что характер кристаллизации железосодержащих стекол зависит от отношения  $\text{FeO}/\text{F}_2\text{O}_3$ . Например, в стеклах, содержащих оксиды кремния, алюминия, железа, кальция, магния, калия и натрия, объемная кристаллизация происходит тогда, когда  $\text{F}_2\text{O}_3/\text{FeO} > 3$ . При  $3 > \text{F}_2\text{O}_3/\text{FeO} \geq 2,22$  происходит только поверхностная кристаллизация.

Значительное влияние на характер кристаллизации оказывает и общая концентрация окислов железа. В стеклах системы  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{F}_2\text{O}_3 - \text{R}_2\text{O}$ , содержащих 9–2 % окислов железа, кристаллизация имеет крупнозернистый поверхностный характер, а наибольшую склонность к объемной кристаллизации обнаруживают стекла с содержанием окислов железа более 12 %.

Наиболее распространенным в настоящее время является представление о расслаивающем действии ионов железа на стекла. Образование двух жидкостей, у которых одна обогащена кремнеземом, а другая – оксидом железа, облегчает протекание процесса кристаллизации. При этом железосодержащая фаза, выделяющаяся либо в виде капель, либо в виде непрерывной фазы, является менее устойчивой по сравнению с силикатной и образует в стекле зародыши в виде герценита, маггелита, магнетита, магнезиоферрита.

В восстановительной среде ионы железа находятся в двухвалентной форме. Поэтому в центральных частях структуры пористых заполнителей, формировавшейся в восстановительной среде, они имеют шестерную координацию. Кристаллизационная способность силикатных стекол резко возрастает, если суммарное содержание молей  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  превышает  $0,25\text{SiO}_2$ .

Таким образом, получение заполнителей с пористой структурой может происходить разными способами: созданием пор в гранулах на стадии их формования, вспучиванием сформованных гранул, спеканием рационально подобранной шихты с последующим дроблением охлажденной массы, дроблением пористой горной породы. Технология получения заполнителей путем создания пористой структуры на стадии формования гранул с последующим их обжигом не получила промышленного развития. В настоящей работе рассматриваются только вопросы создания пористой структуры вспучиванием сырцовых гранул и спеканием шихты.

#### Список литературы

1. Петров, В.П. Физико-химические основы и сырьевая база производства высокопрочных пористых заполнителей / В.П. Петров // *Строительные материалы*. – 2005. – № 8. – С. 28–30.
2. Макридин, Н.И. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // *Строительные материалы*. – 2009. – № 1. – С. 51–54.
3. Максимова, И.Н. Технологические особенности формирования структуры и свойств конструкционных легких бетонов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2012. – № 2. – С. 45–48.
4. Бремнер, Т.У. Легкий бетон – состояние и перспективы / Т.У. Бремнер, В.Н. Ярмаковский // *Научные труды 2-й Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону*. 5-9 сентября 2005, г. Москва. В 5 томах. Том 1. Пленарные доклады. – М.: Дипак, 2005. – 440 с. – С. 65–82.
5. Петров, В.П. Пористые заполнители из отходов промышленности / В.П. Петров, С.А. Токарева // *Строительные материалы*. – 2011. – № 12. – С. 46–51.

#### References

1. Petrov, V.P. Physico-chemical bases and raw material base of production of high-strength porous aggregates / V.P. Petrov // *Construction and building materials*. – 2005. – No. 8. – P. 28–30.

2. Makridin, N.I. Mechanical behavior of structural expanded clay concrete under axial compression / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Construction and building materials. – 2009. – No. 1. – P. 51–54.
3. Maksimova, I.N. Technological features of the formation of the structure and properties of structural light concrete / I.N. Maksimova, N.I. Makridin // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 2. – P. 45–48.
4. Bremner, T.U. Light concrete – state and prospects / T.U. Bremner, V.N. Yarmakovsky // Scientific works of the 2nd All-Russian (International) conference on concrete and reinforced concrete. September 5-9, 2005. Moscow. In 5 volumes. Vol. 1. Plenary talks. – M.: Deepak, 2005. – 440 p. – P. 65–82.
5. Petrov, V.P. Porous fillers from industrial waste / V.P. Petrov, S.A. Tokareva // Construction and building materials. – 2011. – No. 12. – P. 46–51.



УДК 519.7:69

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

**Будылина Евгения Александровна**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Инфокогнитивные  
технологии»  
E-mail: bud-ea@yandex.ru

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

**Гарькина Ирина Александровна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

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

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

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

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

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

**Danilov Aleksander 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

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К СИСТЕМНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Предлагаются концептуальные подходы к проектированию композиционных материалов как сложных многопараметрических многосвязных систем с системными атрибутами при противоречивых критериях.

*Ключевые слова:* композиционные материалы как сложные системы, декомпозиция, автономные исследования отдельных подсистем, условия переноса на функционирование целостной системы

## CONCEPTUAL APPROACHES TO SYSTEM DESIGN OF COMPOSITE MATERIALS

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

Conceptual approaches to the design of composite materials as complex multiparameter multiply connected systems with systemic attributes under conflicting criteria are proposed.

*Keywords:* composite materials as complex systems, decomposition, autonomous studies of separate subsystems, transfer conditions to the functioning of an integral system

*В системном подходе к синтезу композиционных материалов предполагается:*

- процесс *принятия решений* начинается с выявления и четкой формулировки конкретных целей;
- проблема рассматривается как целое, как *единая система*; выявляются все последствия и взаимосвязи каждого частного решения;

– определяются и анализируются *возможные альтернативные пути достижения целей*;

– *цели отдельных подсистем не вступают в конфликт с целями всей системы*;

– использование *принципа от абстрактного к конкретному*;

– *единство анализа и синтеза*; выявление в объекте разнокачественных связей и их взаимодействия и др.

Первый шаг – *определение проблемы и ее элементов*; охват проблемного поля (контекст, среда существования проблемы). Анализ проблемы, ее *декомпозиция* на отдельные элементы дают возможность формирования различных комбинаций выделенных элементов. Такой синтез часто позволяет спроектировать несколько вариантов системы. Нередко можно найти вполне действенные варианты решения проблемы интуитивно.

Нами системный подход широко использовался и при имитационном моделировании ряда динамических объектов и системном синтезе соответствующих их моделей.

*Проектирование композиционного строительного материала* (см. рисунок) всегда начиналось с формирования исходных данных: условия эксплуатации, определяющие основные требования к свойствам композита и их компонентов; механические, физические, химические и другие свойства материала, определяющие работоспособность изделия (пределы прочности, вязко-упругие характеристики, сопротивления ползучести, усталости; параметры окружающей среды при эксплуатации и их влияние на свойства материала; выбор состава композита и технологии его производства).

*В числе экономических параметров* рассматривались объемы производства материала; расходы на исследования и испытания; капиталовложения в производство, потребность в специальном оборудовании, наличие сырьевой базы основных компонентов композиционного материала; расходы, связанные с транспортировкой сырья; возможность использования отходов и т.д.

*Социальные факторы* включали условия и степень безопасности труда при изготовлении материала и изделий из него, влияние производства на окружающую среду, уровень квалификации производственного персонала, необходимость подготовки кадров и др. Основные проектные данные определялись картой технического уровня планируемой продукции (определялся по результатам патентно-информационных исследований при сопоставлении их с банком данных по материалам).

Для того чтобы новые материалы (изделия) обладали конкурентоспособностью, их показатели на момент начала производства выбирались из условий превосходства потребительских и технико-экономических параметров лучших аналогов. Сначала осуществлялся ориентировочный выбор материала матрицы и основных компонентов, а также технология производства. Затем оптимизировался состав композита по технико-экономическим критериям (выбор наилучшего соотношения концентрации компонентов).

*Наилучший состав* отвечал критериям *оптимальности* (количественным показателям, определяющим предельную меру технико-экономической эффективности композита и позволяющим сравнить альтернативные составы при выборе лучшего из них).

*Оптимизация состава* базировалась на экспериментальном определении тех или иных характеристик композита путем испытания образцов разного состава. Объем экспериментальных работ зависел от количества определяемых характеристик и точности их оценки. *Сокращение количества измерений* производилось методами планирования эксперимента. Информацию об *эффективности альтернативных составов* получали на основе одновременного *дисперсионного анализа* выделенных факторов. *Заключительная стадия создания композита* – оценка его свойств как расчетными (на основе моделирования структуры композитов), так и экспериментальными методами.

*Прогнозирование свойств* осуществлялось по специально разработанным моделям существующих композитов. *Аналитическое исследование моделей* позволило свести к *минимуму* количество экспериментов с образцами композитов и сделало разработку более дешевой.



Схема проектирования композиционного материала

*Экспериментальные методы оценки свойств* композитов (образцы материалов стандартной или специальной формы в соответствии с принятыми программой и методикой испытаний) применялись для оценки достоверности расчетных методов и формирования критериев качества композиционных материалов. Полученные в экспериментах результаты сравнивались с проектными данными (если последние не достигались, корректировались состав и структура композиционного материала). Таким образом, конструирование композиционных материалов есть творческий процесс, теория которого находится, в основном, на стадии накопления результатов аналитических и экспериментальных исследований и определяется высокой квалификацией и инженерной интуицией участников.

Налицо необходимость *разработки новых композитов* (с заранее заданными свойствами), технологии их производства и методов расчета. Дорогостоящие экспери-

ментальные исследования по определению свойств приводят к целесообразности *автономных исследований сепаратных подсистем* в иерархической структуре с разработкой *частных математических моделей* при конструировании композитов. *Проектирование композитов как сложных систем*, естественно, всегда производилось с соблюдением основных принципов системного подхода с построением математических моделей отдельных подсистем и описанием их взаимодействия. Пока авторы большинства работ ограничиваются постановкой и исследованием математических задач, оставляя без внимания содержательные и человеческие аспекты практической идентификации: нет детальной общей схемы идентификации, ориентированной на использование определенной системы научных понятий, достаточных с точки зрения большинства исследователей для обоснования. *Идентификация относится к классу некорректных задач* и всегда носит *междисциплинарный характер*: каждый из представителей играет доминирующую роль при определении отдельных фрагментов системы; а межэлементные связи определяются группой в целом.

*Декомпозиция материала* на основе *когнитивного моделирования* позволяет свести синтез целостной системы к синтезу подсистем [1, 2]: нами отдельные фрагменты рассматривались как подсистемы; исходили из *гипотезы существования математической модели*, заменяющей объект идентификации во всех необходимых случаях (при *многоуровневой иерархической структуре материала как многосвязной системы*). Очевидна целесообразность описания материала на основе *формализации его свойств* (определяют и структуру!). *Каждое из свойств при оптимизации рассматривается как один из частных критериев* (в общем случае – противоречивых).

При описании *каждой* из физико-механических характеристик материала нами задавался *пробный класс математических моделей*, которому, по мнению участников когнитивного моделирования, *гипотетически могла бы принадлежать истинная ее модель*. Было признано целесообразным описание *каждой из эксплуатационных характеристик материала в виде асимптотического значения решения* (кинетический процесс формирования физико-механической характеристики) некоторого дифференциального уравнения. Такое представление не является единственным (при необходимости возможна замена пробного класса). На этапе *структурной* идентификации при поиске адекватной модели материала осуществлялись выбор и интерпретация пробного множества моделей как приемлемого приближения к адекватному множеству моделей. На этапе *параметрической* идентификации производилась интерпретация выбранных пробных значений параметров классического типа как приемлемых приближений к адекватным значениям (при *непараметрической* идентификации имеется хотя бы один *функциональный параметр*, допустимыми значениями которого являются функции). Каждый элемент иерархической структуры качества системы определяет автономное (без учета *всех* межсистемных связей) качество сепаратной системы. *Результаты автономных исследований модулей использовались для определения интегративных свойств* (определяются связями между модулями, уровнями и на каждом из уровней; в основном, лишь на качественном уровне). Условия для переноса результатов автономных исследований на систему в целом определяются полнотой понимания процессов формирования структуры и свойств системы [3...5]. Так, при переносе результатов автономных исследований смачиваемости на формирование структуры и свойств материала необходим учет смачиваемости входящих компонентов *в стесненных условиях*. Кинетические процессы формирования структуры и характеристик материала можно рассматривать как результаты автономных исследований сепаратных модулей (параметры кинетических процессов определяются с учетом межсистемных связей; неявно присутствуют эталонные модели, предусматривающие одновременную децентрализацию по входам). В основе конструирования всегда лежит *техническое задание* с указанием организации и свойств системы. Возможность создания композита и реализация технического задания первоначально всегда определялась на основе *когнитивного моделирования*: указывались *иерархическая структура* критериев качества, управляющие факторы, а в

соответствии с выделенными критериями качества соответствующие структурные схемы системы (осуществлялась *формализация критериев* качества системы и разрабатывались *математические модели* для каждого выделенного масштабного уровня). Наконец, осуществлялись *формализация многокритериальной задачи* и ее решение (определялись оптимальная *организация и свойства системы*).

### Список литературы

1. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3/4. – С.30–37.
2. Гарькина, И.А. Управление качеством материалов со специальными свойствами / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Проблемы управления. – 2008. – № 6. – С. 67–74.
3. Гарькина, И.А. Сложные системы модульной структуры: композиты, автономные исследования сепаратных подсистем / И.А., Гарькина А.М. Данилов, Е.И. Ермолаева, А.М. Зарецкий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – №1(15). – С.152–156.
4. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2018. – №1–2. – С.60–62.
5. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – №3. – С. 143–159.

### References

1. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Bulletin of higher educational institutions. Building. – 2009. – №. 3/4. – P.30–37.
2. Garkina, I.A. Quality management of materials with special properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Control science. – 2008. – №. 6. – P. 67–74.
3. Garkina, I.A. Complex systems of modular structure: composites, autonomous studies of separate subsystems / I.A. Garkina, A.M., Danilov E.I. Ermolaeva, A.M. Zaretsky // Bulletin of Kazan State Architectural and Construction University. – 2011. – №. 1 (15). – P.152–156.
4. Garkina, I.A. Evolution of concepts of composite materials from the standpoint of a paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2018. – №. 1–2. – P. 60–62.
5. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – № 3. – P.143–159.

УДК 628.3:547.91:532.62

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Вилкова Наталья Георгиевна**, доктор химических наук, профессор кафедры «Физика и химия»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru*Пензенский государственный университет*

Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, д.40, тел. (8412) 368209; факс (8412) 368400

**Мишина Светлана Ивановна**, кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и теория и методика обучения химии»  
E-mail: elancv@mail.ru*Институт биофизики клетки Российской академии наук*

Россия, 142290, Пушкино, пр. Науки, 3, тел. (4967)739125, факс (4967)739125

**Теплов Илья Юрьевич**, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник  
E-mail: t.i.y@mail.ru*Penza State University of Architecture and Construction*

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

**Vilkova Natalya Georgievna**, Doctor of Chemical Sciences, Professor of the department «Physics and Chemistry»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru*Penza State University*

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St., tel. (8412) 368209; fax (8412) 368400

**Mishina Svetlana Ivanovna**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the department «Chemistry and Theory and Methodology Teaching Chemistry»  
E-mail: elancv@mail.ru*Institute of Cell Biophysics of Russian Academy of Sciences*

Russia, 142290, Pushchino, 3, ScienceProspect, tel.(4967) 739125, fax (4967) 739125

**Teplov Ilya Yurievich**, Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher  
E-mail: t.i.y@mail.ru

## ПЕНЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ГИДРОФОБИЗОВАННЫЕ ЧАСТИЦЫ, ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ПЛЕНКИ

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, И.Ю. Теплов

Одной из важных экологических проблем, решение которой основано на применении материалов со значительной удельной поверхностью, является очистка воды от углеводородов, содержащихся как в объемной фазе (в соответствии с растворимостью углеводорода), так и на поверхности воды в виде пленок. Известны способы удаления нефти и нефтепродуктов с поверхности сточных вод с помощью сорбирующих составов с последующим сбором и утилизацией сорбента. В качестве сорбирующих составов могут быть использованы смеси силикатов щелочных металлов, спирта и хлорида кальция; полые микробаллоны асфальтита; хинин и хитозан; карбонатный порошок; продукт пиролиза твердого осадка бытовых сточных вод и др. Изготовление перечисленных составов для очистки воды сопровождается технологическими сложностями: прокаливанием при высоких температурах ( $\geq 1000^\circ\text{C}$ ), измельчением до дисперсности не менее 1 мм, обработкой перегретым водяным паром. Недостатком полученных сорбентов часто является их невысокая сорбционная емкость. Целью данной работы является получение и определение оптимального количества пен, содержащих твердые гидрофобизованные частицы (гидроксида алюминия и аэросила различной степени дисперсности), для очистки воды от углеводородной пленки. Особенностью предложенного в данной работе метода исследования является контроль эффективности удаления углеводорода. Для этого используют фотосъемку поверхности водной фазы и оценку площади углеводородной пленки с помощью веб-камеры. В работе даны методы получения пен, содержащих гидрофобизованные частицы, и определены их оптимальные количества для удаления пленки толуола с поверхности воды. Наиболее перспективными в

процессах очистки воды от углеводородов являются пены, стабилизированные твердыми частицами гидрофобизованного гидроксида алюминия.

*Ключевые слова: пена, получение, гидрофобизация, сорбент, аэросил, гидроксид алюминия*

## FOAMS CONTAINING HYDROPHOBIZED PARTICLES FOR PURIFICATION OF WATER FROM HYDROCARBON FILM

N.G. Vilkova, S.I. Mishina, I.Yu. Teplov, A.A. Shumkina

One of the important environmental problems, the solution of which is based on the use of materials with a significant specific surface area, is purification of water from hydrocarbons contained both in the bulk phase (in accordance with the solubility of the hydrocarbon) and on the water surface in the form of films. Methods for removing oil and oil products from the surface of wastewater using sorbent compositions, followed by collection and disposal of the sorbent are known. As sorbing compositions, mixtures of silicates of alkali metals, alcohol and calcium chloride, hollow microballoons of asphaltite, quinine and chitosan, carbonate powder, pyrolysis product of solid sludge of domestic wastewater and others can be used. The manufacture of the listed compositions for water purification is accompanied by technological difficulties: calcination at high temperatures ( $\geq 1000^\circ\text{C}$ ), grinding to a fineness of at least 1 mm, and treatment with superheated steam. The disadvantage of the obtained sorbents is often their low sorption capacity. The purpose of this work is to obtain and determine the optimal amount of foams containing solid hydrophobized particles (aluminum hydroxide and aerosil of varying degrees of dispersion) for water purification from a hydrocarbon film. A feature of the research method proposed in this work is the control of the efficiency of hydrocarbon removal. To do this, photographing the surface of the aqueous phase and assessing the area of the hydrocarbon film using a web camera are used. The paper presents methods for producing foams containing hydrophobized particles and determines their optimal amounts for removing a toluene film from the water surface. The most promising in the processes of water purification from hydrocarbons are foams stabilized by solid particles of hydrophobized aluminum hydroxide.

*Keywords: foam, obtaining, sorbent, aerosil, aluminum hydroxide, hydrophobization*

Интенсивное исследование пен и эмульсий, стабилизированных гидрофобизованными частицами, обусловлено широкими возможностями их технологических приложений. Обычно в качестве наиболее распространенных твердых веществ-стабилизаторов используются глина, уголь, кремнезем, стекло, оксиды и гидроксиды многих металлов. Установлено, что частицы твердого стабилизатора адсорбируются на поверхности вода/воздух, образуя межфазный слой, который замедляет процесс диффузионного переноса газа в пене. Устойчивость пен в присутствии твердой фазы обусловлена [1–8]: адсорбцией частиц и образованием межфазных слоев на поверхности пенных пузырьков и пленок; капиллярным давлением в пенной пленке, содержащей твердую фазу; стерическими или электростатическими взаимодействиями в адсорбционных слоях; механической прочностью и упругостью структур, которые формируются в дисперсионной среде обычно в результате взаимодействия твердых частиц, поверхностно-активных веществ и воды. Известно, что присутствие твердых частиц на границе раздела фаз приводит к снижению как межфазного натяжения на границе раздела жидкость – жидкость [9, 10], так и поверхностного натяжения на границе раздела жидкость – газ [3, 11]. Показано, что образование плотного слоя стабилизаторов на поверхности газового пузырька или капли определяется энергией адсорбции отдельной частицы на межфазной поверхности [1, 8]. В настоящее время подобные трехфазные дисперсные системы применяют: в области тонкого химического катализа; в качестве темплата для получения микросфер, микрокапсул, используемых для контролируемой адресной доставки лекарственных препаратов; для получения пористых биоматериалов, служащих тканевыми каркасами, пористых проводников, «умных» материалов, реагирующих на изменение условий среды. Одной из важных экологических проблем, решение которой основано на применении материалов со значительной удельной поверхностью, является очистка воды от углеводо-

родов, содержащихся как в объемной фазе (в соответствии с растворимостью углеводорода), так и на поверхности воды в виде пленок.

Известен способ удаления нефти и нефтепродуктов с поверхности сточных вод с помощью сорбирующих составов с последующим сбором и утилизацией сорбента. В качестве сорбирующих составов могут быть использованы смеси силикатов щелочных металлов, спирта и хлорида кальция, полые микробаллоны асфальтита, хинин и хитозан, модифицированный аэросил, карбонатный порошок, продукт пиролиза твердого осадка бытовых сточных вод, с нагревом до 600–800 °С в течение 2–4 часов, шлам известковой регенерации щелочи, составы на основе торфа и на основе мочевиноформальдегидной смолы, порофора и фурилового спирта.

Отметим, что изготовление перечисленных составов для очистки воды сопровождается технологическими сложностями: прокаливанием при температуре 1000–1250 °С, измельчением до дисперсности не менее 1 мм, обработкой перегретым водяным паром при температуре 105–110 °С без доступа воздуха и одновременным ультрафиолетовым облучением, карбонизацией при температуре 280–340 °С. Недостатком полученных сорбентов часто является их невысокая сорбционная емкость.

*Цель данной работы* – получение и определение оптимального количества пен, содержащих твердые гидрофобизованные частицы гидроксида алюминия и аэросила различной степени дисперсности, для очистки воды от углеводородной пленки.

#### Метод получения трехфазных пен – сорбентов

Использовали два вида коллоидного кремнезёма: а) Аэросил-380 – порошок с диаметром частиц 12 нм; б) 41 % (в пересчете на SiO<sub>2</sub>) золь марки Ludox-HS с диаметром частиц 15 нм. Частицы аэросила агрегированы в исходном состоянии, а полидисперсные агрегаты присутствуют во всех дисперсиях кремнезема. Средний диаметр образующихся агрегированных частиц равен 3–30 мкм.

Пену получали смешиванием определенной навески Аэросила-380 с определённым объёмом дистиллированной воды. К полученной суспензии по каплям добавляли гексилламин до образования устойчивой системы. В табл. 1 представлены массовое содержание аэросила и концентрация гексилламина (при pH = 10,6), используемые для приготовления пены.

Т а б л и ц а 1

Концентрации аэросила и гексилламина, необходимые для приготовления пены  
(концентрация NaCl в исходной суспензии 5 ммоль/л)

Аэросил, ω %	0,3	0,5	0,6	1	2	4	6
Гексилламин, ммоль/л	33,5	33,46	41,36	33,3	32,55	54,71	54,72
Гексилламин, ω %,	0,45	0,44	0,54	0,44	0,43	0,72	0,76

Отметим, что для получения пен с малым массовым содержанием твердых частиц (ω < 1 %) необходимы длительное встряхивание и перемешивание суспензии миксером в течение 3 минут после добавления небольших (0,02 мл) порций гексилламина. В случае с более концентрированными суспензиями (2–6 % аэросила) устойчивые пены образуются при добавлении всего объема гексилламина и встряхивании (при перемешивании) в течение 2 минут.

Пены, стабилизированные гидроксидом алюминия, получали смешением 30 мл раствора с массовым содержанием 0,05–3 % сульфата алюминия и определенных количеств масляной кислоты (табл. 2) с последующим добавлением двумолярного раствора гидроксида натрия (до pH = 4,5–5).



Концентрации сульфата алюминия и бутановой кислоты, необходимые для получения твердого сорбента,  $pH = 4,5-5$

Массовое содержание $Al_2(SO_4)_3$	0,05	0,1	3	10
Концентрация масляной кислоты, ммоль/л	77,7	32,3–36,7	127–1030	$\geq 127$
Массовое содержание масляной кислоты, $\omega$ %	0,71	0,29–3,35	1,16–9,41	–

Все полученные пены высушивали на воздухе в течение 1–2 недель до превращения их в твердое тело. Полученную таким образом сухую пену наносили на поверхность углеводородной пленки. Расход сухой пены (в соответствии с принятым в литературе) оценивали в граммах на 1 грамм углеводорода.

#### Метод удаления углеводородной пленки с поверхности воды

Особенностью предложенного в данной работе метода является контроль эффективности удаления углеводорода. Во всех предложенных в литературе способах наблюдение за качеством очистки водной фазы проводят визуально. В данной методике используют фотосъемку поверхности водной фазы с помощью веб-камеры, что позволяет оценить и площадь углеводородной пленки, и качество очистки поверхности.



Рис. 1. Углеводородная пленка на поверхности воды, содержащая пену, стабилизированную твердыми частицами

Исследование эффективности удаления углеводородной пленки с поверхности воды с помощью стабилизированных пен проводили следующим образом. В стакан наливали воду определённого объёма (35 мл), затем на поверхность воды наносили углеводород (в опытах – толуол) определённого объёма (0,2 мл). Производили фотосъемку поверхности воды с плёнкой углеводорода с помощью веб-камеры Megapixel 10XDigitalZoom  $f=3,85$  мм. После этого на углеводородную плёнку наносили определенную навеску сухой пены и повторяли съёмку. Затем углеводородную плёнку с пеной удаляли с помощью перфорированной ложки. Съёмку повторяли для анализа эффективности очистки поверхности. Проводили выбор оптимального количества гидрофобизованной пены для полного удаления пленки.

#### Изучение сорбционных свойств трехфазной пены, содержащей Аэросил-380

Как показано ранее, полученную определенным образом пену высушивали на воздухе, и изучали свойства полученного сухого образца. В частности, образец 2 (табл. 3) был получен из суспензии, содержащей 6 % Аэросила-380, 93,43 % воды и 0,59 % гидрофобизатора – гексилamina. Исходная углеводородная пленка получена нанесением 0,2 мл толуола на поверхность воды объемом 35 мл. Нанесение на

поверхность пятна пены (образец 2) в количестве 59 мг приводило к полному удалению пленки. Дальнейшие исследования были направлены на эмпирический подбор минимального количества сухой пены, достаточного для удаления пленки. Установлено, что масса сухой пены в количестве 18 мг является достаточной для полного удаления пленки. На рис. 2 представлена поверхность воды, очищенная от углеводородной пленки.



Рис. 2. Поверхность воды без толуола

Расход сухой пены в расчете на 1 грамм углеводорода составляет 0,102 грамма.

Т а б л и ц а 3

Очистка воды пеной, полученной на основе Аэросила-380

№	Состав пены	Объем воды, мл	Масса пены, мг	Объем углеводорода, мл	Степень удаления углеводорода, %
1	Вода – 93,43 % SiO <sub>2</sub> – 6 % Гексиламин – 0,59 %	35	59	0,2	100
2	Вода – 93,43 % SiO <sub>2</sub> – 6 % Гексиламин – 0,59 %	35	15	0,2	50
3	Вода – 93,43 % SiO <sub>2</sub> – 6 % Гексиламин – 0,59 %	35	18	0,2	100

Были проделаны опыты по очистке воды пеной, полученной из золя LudoxHS-40 с исходным нанометрическим размером частиц. Показано, что уменьшение размера частиц позволяет использовать меньшие количества пены для обработки воды. Установлено, что добавление 14 мг пены состава: 20 % LudoxHS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 59,4 ммоль/л гексиламина – является достаточным для полного удаления углеводорода. В расчете на 1 г углеводорода расход пены составляет 0,081 г.

Большая гидрофобизация поверхности и увеличение концентрации гексиламина в исходной суспензии до 110 ммоль приводили к некоторому увеличению количества сухой пены для качественной обработки воды.

Установлено, что добавление 6 мг пены состава: 20 % LudoxHS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина – является недостаточным для полного удаления углеводорода. В этом случае остается 1/5 исходной площади. При добавлении 14 мг пены такого же состава остается 1/10 исходной площади. Количество пены, достаточное для полного удаления углеводорода, равно 16 мг, что в пересчете на 1 грамм углеводорода составляет 0,092 г.

Удаление пленки сухой пеной, полученной на основе золя LudoxHS-40

№	Состав пены	Масса пены, мг	Объем углеводорода, мл	Степень удаления углеводорода, %
1	20 % LudoxHS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 59,4 ммоль/л гексиламина	14	0,2	100
2	20 % LudoxHS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина	6	0,2	80
3	20 % LudoxHS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина	14	0,2	90
4	20 % LudoxHS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина	16	0,2	100

Полученные результаты позволяют заключить: хотя при увеличении гидрофобности исходных частиц возрастает их смачиваемость исследуемым углеводородом, однако понижение качества очистки, возможно, обусловлено уменьшением удельной поверхности полученного материала на стадии его формирования.

#### **Изучение сорбционных свойств пены, стабилизированной твердыми гидрофобизованными частицами гидроксида алюминия**

Особый практический интерес представляет разработка метода очистки воды с помощью пены, стабилизированной твердыми гидрофобизованными частицами гидроксида алюминия. Использование таких пен является перспективным, поскольку сульфат алюминия и образующиеся в процессе гидролиза сложные комплексные соединения, заряд которых зависит от pH среды, традиционно применяют для очистки воды на стадии коагуляции примесей, содержащихся в водной фазе. В данном методе очистки воды использовали пену, полученную из растворов сульфата алюминия (с массовым содержанием 3 %) при добавлении определенных количеств масляной кислоты. Установлено, что количество сухого пенного образца массой 7,8 мг позволяет полностью удалить углеводородную пленку. Опыт с меньшим (3,9 мг) количеством сульфата алюминия представлен на рис. 3. Данная масса пены является достаточной для полной очистки поверхности воды от углеводородной пленки.

Расход сухой пены в расчете на 1 грамм углеводорода составляет 0,022 грамма.



Рис. 3. Пена на основе 3 % сульфата алюминия, нанесенная на поверхность воды

Применение сухой пены, стабилизированной твердыми гидрофобизованными частицами гидроксида алюминия

№	Состав пены	Масса пены, мг	Объём углеводорода, мл	Степень удаления углеводорода, %
1	3 % $Al_2(SO_4)_3$ 5,5 % масляной кислоты 91,5 % воды	7,8	0,2	100
2	3 % $Al_2(SO_4)_3$ 5,5 % масляной кислоты 91,5 % воды	3,9	0,2	100

Таким образом, в работе предложены методы получения пен, содержащих гидрофобизованные частицы, и определены их оптимальные количества для удаления углеводородной пленки. Уменьшение радиуса частиц-стабилизаторов на стадии формирования дисперсной системы позволяет полностью удалить пленку толуола меньшим количеством пены. Наиболее перспективными в процессах очистки воды от углеводородов являются пены, стабилизированные твердыми частицами гидрофобизованного гидроксида алюминия.

#### Список литературы

1. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B.P. Binks, J. Clint // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
2. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials.* – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
3. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilкова, S.I. Karakashev // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2011. – Vol. 165, N. 2. – P. 108–116.
4. Vilкова, N.G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox / N.G. Vilкова, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendeleev Communication.* – 2012. – Vol.22, N 4.– P. 227–228.
5. Вилкова, Н. Г. Влияние гидрофобности частиц кремнезема на устойчивость пен и пенных пленок / Н. Г. Вилкова, С. И. Еланева // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология.* – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 62–66.
6. Kaptey, G. On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2006. – Vol.282–283. – P. 387–01.
7. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 391 p.
8. Vilкова, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of the interfacial tension or surface tension / N.G. Vilкова, A.V. Nushtaeva // *Mendeleev commun.* – 2013. – Vol.23, N 3. – P. 155-156.
9. Emrani, A.S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO<sub>2</sub> foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2017. – Vol. 524. – P. 17–27.
10. Erasov, V.S. Stability and rheology of foams containing microbial polysaccharide and particles of silica and bentonite clay. / V.S. Erasov, M.Y. Pletnev, B.V. Pokidko // *Colloid Journal.* – 2015. – Vol.77, No. 5. – P. 614–621.

11. Saha, M. Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles/ M. Saha, M.E. Kabir, S. Jeelani // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol.479. – P. 213–222.

### References

1. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B.P. Binks, J. Clint // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
2. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
3. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilkova, S.I. Karakashev // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol. 165, N. 2. – P. 108–116.
4. Vilkova, N.G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendelev Communication*. – 2012. – Vol.22, N 4.– P. 227–228.
5. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobicity of silica particles on the stability of foams and foam films / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva // *Izvestiya vysshikh educational institutions.Series: Chemistry and Chemical Technology*. – 2013. – Vol.56, N. 9. – P. 62–66.
6. Kaptey, G. On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2006. – Vol.282–283. – P. 387–01.
7. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 391 p.
8. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of the interfacial tension or surface tension / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva // *Mendelev commun*. – 2013. – Vol.23, N 3. – P. 155-156.
9. Emrani, A.S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO<sub>2</sub> foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017. – Vol. 524. – P. 17–27.
10. Erasov, V.S. Stability and rheology of foams containing microbial polysaccharide and particles of silica and bentonite clay. / V.S. Erasov, M.Y. Pletnev, B.V. Pokidko // *Colloid Journal*. – 2015. – Vol.77, No. 5. – P. 614–621.
11. Saha, M. Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles/ M. Saha, M.E. Kabir, S. Jeelani // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol.479. – P. 213–222.

УДК 691.4

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

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

**Куимова Елена Ивановна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: lena-kui@mail.ru

**Зайцева Мария Владимировна,**  
аспирант

*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

**Kuimova Elena Ivanovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Mathematics and  
Mathematical Modeling»  
E-mail: lena-kui@mail.ru

**Zaitseva Maria Vladimirovna,**  
Postgraduate

## ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

В.И. Логанина, Е.И. Куимова, М.В. Зайцева

Рассмотрены вопросы достоверности контроля качества производства строительных материалов и изделий. Структурная схема надежности контроля строительных материалов представлена как комбинация последовательно соединенных технологических операций. На примере сухих строительных смесей дана оценка достоверности контроля качества.

*Ключевые слова: контроль продукции, обеспеченность качества, структурная схема надежности, вероятность брака*

## ASSESSMENT OF RELIABLE CONTROL OF DRY BUILDING MIXTURES PRODUCTION

V.I. Loganina, E.I. Kuimova, M.V. Zaitseva

The article deals with the issues of reliability of quality control of production building materials and products. The structural diagram of the reliability of control of building materials is presented as a combination of series-connected technological operations. On the example of dry building mixtures, the assessment of the reliability of quality control is given.

*Keywords: product control, quality assurance, structural diagram of reliability, probability of rejection*

Обеспечение поступления на рынок качественной продукции связано с соблюдением требований нормативных документов на эту продукцию [1]. Однако существующая в настоящее время система контроля качества строительных материалов и изделий, предусматривающая проведение входного, операционного и приемочного контроля, не предусматривает оценку достоверности результатов контроля [2–4]. В соответствии с ГОСТ Р 8.731–2010 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Системы допускового контроля. Основные положения» требования к показателям достоверности контроля устанавливаются, основываясь на необходимости исключить или снизить риск принятия неправильного решения о состоянии объекта контроля. В ГОСТ Р 8.563–2009 и ГОСТ 8.051–81 предложено нормировать комплекс-

ный показатель достоверности контроля  $P_D$  как наиболее простой и наглядный на уровне  $P_D \geq 0,95$ .

К задачам контроля относят вычисление:

- ✓  $P_{Б-Г}$  – вероятности признания бракованного объекта контроля годным;
  - ✓  $P_{Г-Б}$  – вероятности признания годного объекта контроля бракованным;
  - ✓  $P_{Г-Г}$  – вероятности признания годного объекта контроля годным;
  - ✓  $P_{Б-Б}$  – вероятности признания бракованного объекта контроля бракованным.
- Указанные вероятности составляют полную группу событий

$$P_{Б-Г} + P_{Г-Б} + P_{Г-Г} + P_{Б-Б} = 1. \quad (1)$$

Любой выход за границы допуска считается нарушением. Известно, что любой процесс изготовления связан с вариациями его параметров, вызванными большим количеством воздействующих на него факторов. Технологический процесс производства строительных материалов и изделий может быть представлен моделью, включающей:

- входные параметры;
- влияющие регулируемые параметры;
- влияющие нерегулируемые параметры;
- выходные параметры.

Под входными параметрами понимаются показатели качества сырья, материалов и комплектующих изделий, из которых производится продукция. Под влияющими регулируемыми параметрами понимаются параметры и показатели состояния технологического оборудования, энергии, технологические параметры (температура и влажность, время обработки и т.д.). Под влияющими нерегулируемыми параметрами понимаются параметры, имеющие случайную природу и оказывающие влияние на технологический процесс. Сюда относятся износ оборудования, колебания температуры, квалификация персонала, дисциплинарные нарушения и т.д. Именно параметры этой группы вызывают те значительные колебания в показателях точности и стабильности технологических процессов, которые, в свою очередь, вызывают колебания в качестве производимой продукции [5].

Под выходными параметрами понимаются показатели качества продукции: функциональные параметры, эксплуатационные показатели или потребительские свойства [6].

Для определения соответствия или несоответствия фактического состояния производства требованиям нормативных документов проводят проверку:

- соответствия показателей и основных характеристик продукции требованиям нормативной документации;
- соответствия технологических процессов её изготовления;
- материалов, сырья.

Структурную схему надежности контроля строительных материалов можно представить как комбинацию последовательно соединенных элементов – входного, операционного и приемочного [7, 8]. При этом достоверность системы контроля будет определяться по формуле

$$P(A) = P(A_1)P(A_2)P(A_3), \quad (2)$$

где  $P(A_i)$  – достоверность контроля (входного, операционного, приемочного).

Цель работы – оценить достоверность контроля качества производства строительных материалов и изделий при различных состояниях технологического процесса производства продукции строительного назначения на примере производства сухих строительных смесей (ССС) плотностью менее 1300 кг/м<sup>3</sup>.

Технологический процесс изготовления продукции должен обеспечивать необходимую точность и стабильность [9, 10]. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования) изложены в нормативном документе Р 50-601-20-91 «Рекомендации по оценке точности и стабильности техноло-

гических процессов (оборудования)». Оценка точности и стабильности технологических процессов производится с использованием полученных выборочных статистических характеристик через сопоставление их с установленным в научно-технической документации полем допуска  $\Delta$  на параметр [11-13].

При правильной настройке технологического процесса математическое ожидание должно соответствовать середине поля допуска  $m$ , задаваемого в нормативно-технической документации на продукцию верхней и нижней границами  $T_v$  и  $T_n$ . В этом случае  $m = m_0$ . При этом в поле допуска находятся  $\pm 3\sigma$ . Однако в процессе производства зачастую среднее значение показателя хотя и находится в поле допуска, но отклоняется от его середины. Это приводит к низкой воспроизводимости технологического процесса. Кроме того, нередко наблюдается увеличение значения среднеквадратического отклонения. Все это, безусловно, оказывает влияние на обеспеченность качества продукции.

На практике все измерения сопровождаются погрешностями, вызывающими как приемку ряда годных изделий по действительным отклонениям, выходящим за границы поля допуска (с заданной вероятностью), так и ошибочную забраковку некоторой части годных изделий. Отклонения в результате забраковки происходят в границах предельно допустимой погрешности измерения [14].

Будем полагать, что контролируемые параметры являются нормально распределенными случайными величинами с математическим ожиданием, совпадающим с номинальным значением и заданным средним квадратическим отклонением  $\sigma$ .

Измеренное значение контролируемого параметра  $X$  представляем виде обобщенной модели

$$X = U + y, \quad (3)$$

где  $U$  – истинное значение;  $y$  – аддитивная случайная погрешность.

Задача анализа с применением таких показателей достоверности, как вероятности ошибок 1-го и 2-го рода, решалась с применением численных методов с использованием формул Бородачева, в которых  $f$  – плотность гауссовского распределения вероятностей:

$$\alpha_i = \int_a^b f(U) \cdot \left[ \int_{-\infty}^a f(Y) dX + \int_b^{\infty} f(Y) dX \right] dU; \quad (4)$$

$$\beta_i = \int_{-\infty}^a f(U) \cdot \left[ \int_a^b f(Y) dX \right] dU + \int_b^{\infty} f(Y) \cdot \left[ \int_a^b f(Y) dX \right] dU, \quad (5)$$

где  $[a_1; b_1]$  – интервал для погрешности  $y_i$  при условии, что значения  $U_i$  попали в интервал  $[a; b]$ ;  $i$  – оцениваемый параметр

Если на определенном этапе контролируются  $k$  параметров, то обобщенные значения рисков

$$\alpha = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \alpha_i); \quad (6)$$

$$\beta = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \beta_i). \quad (7)$$

Соответственно, достоверность контроля:

$$P = 1 - (\alpha + \beta). \quad (8)$$

Было изучено, как изменяются риски при контроле качества на трех его этапах – входном, операционном и приемочном. Результаты расчетов приведены в табл. 1–4.



Значения рисков производителя и потребителя в зависимости от состояния технологического процесса производства (входной контроль)

Вид сырья	Показатели, характеризующее состояние производства	Границы допуска		Значения среднего арифметического $m$	СКО, $\sigma$	Погрешность измерения	Риск производителя $\alpha$	Риск потребителя $\beta$
		нижняя	верхняя					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Марка цемента	Нормативное	400	500	450	16,6	1%(4,5)	0,001644	0,0005909
	Изменение значения среднего арифметического			420	16,6		0,025	0,017
	Изменение значения СКО			450	20		0,004582	0,002274
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			420	20		0,025	0,019
Зерновой состав песка	НОРМ	0,1	1,3	0,7	0,2	1%(0,007)	0,000133	0,0001132
	Изменение значения среднего арифметического			0,8	0,2		0,0002733	0,0002372
	Изменение значения СКО			0,7	0,25		0,0005246	0,0004679
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			0,8	0,25		0,0007181	0,0006646
Содержание глинистых примесей в песке	НОРМ	0	3	1,5	0,5	1%(0,015)	0,0001126	0,0001004
	Изменение значения среднего арифметического			2	0,5		0,0006728	0,000624
	Изменение значения СКО			1,5	0,6		0,0003543	0,0003366
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			2	0,6		0,001035	0,0009812
Добавки-метил-целлюлоза-содержание активного вещества	НОРМ	90	100	95 %	2	0,10 %	0,000757	0,0006475
	Изменение значения среднего арифметического			96	2		0,001244	0,001093
	Изменение значения СКО			95 %	1,6		0,000171	0,0001339
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			96	1,6		0,0004931	0,0004047

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Добавка – редиспер- гируемый порошок	НОРМ	98	100	99%	0,33%	0,10%	0,001884	0,0005961
	Изменение зна- чения среднего арифметического			98,5	0,33		0,021	0,012
	Изменение значения СКО			99%	0,50%		0,037	0,035
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифме- тического			98,5	0,5		0,027	0,02

Т а б л и ц а 2

Значения рисков производителя и потребителя в зависимости от состояния  
технологического процесса производства (операционный контроль)

Дозирование сырья	Показатели, характери- зующее состояние производства	Граница допуска		Значения среднего арифметического <i>m</i>	СКО, $\sigma$	Погрешность измерения	Риск производителя $\alpha$	Риск потребителя $\beta$
		нижняя	верхняя					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цемент	Нормативное	15	20	17,5	0,83	1% (0,175)	0,001114	0,0005023
	Изменение значе- ния среднего арифметического			16	0,83		0,019	0,014
	Изменение значения СКО			17,5	0,95		0,002539	0,001386
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифме- тического			16	0,95		0,019	0,015
Песок	НОРМ	65	85	75	3,3	2% (1,5)	0,004096	0,0007354
	Изменение значения среднего арифметического			70	3,3		0,034	0,015
	Изменение значения СКО			75	4		0,009968	0,003146
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифме- тического			70	4		0,036	0,02
Добавки- метилцел- люлоза–	НОРМ	0,07	0,15	0,11	0,0133	1%(0,0011)	0,0003239	0,00005893
	Изменение зна- чения среднего арифметического			0,11	0,02		0,01	0,009527
	Изменение значения СКО			0,08	0,02		0,002525	0,0006444

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			1,1	0,33		0,007759	0,007591
Добавка редуцируемый порошок	НОРМ	0,7	1,5	1,2	0,33	1%(0,011)	0,005219	0,004962
	Изменение значения среднего арифметического			1,1	0,5		0,005313	0,005074
	Изменение значения СКО			1,2	0,5		0,005141	0,005029
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического						0,005102	0,004995

Т а б л и ц а 3

Значения рисков производителя и потребителя в зависимости от состояния технологического процесса производства (приемочный контроль)

Наименование показателей качества	Показатели, характеризующие состояние производства	Граница допуска		Значения среднего арифметического $m$	СКО, $\sigma$	Погрешность измерения	Риск производителя $\alpha$	Риск потребителя $\beta$
		нижняя	верхняя					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Нормативное	500	1300	900	133,33	18	0,0006252	0,0003781
	Изменение значения среднего арифметического			1100	133,33		0,007911	0,006146
	Изменение значения СКО			900	160		0,001888	0,001336
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			1100	160		0,008957	0,00751
Подвижность растворной смеси, см	НОРМ	8	12	10	0,67	0,5	0,015	0,001028
	Изменение значения среднего арифметического			11	0,67		0,069	0,021
	Изменение значения СКО			10	1		0,041	0,012
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			11	1		0,064	0,035
Прочность при сжатии, МПа	НОРМ	2,5	5	3,75	0,42	0,075	0,0009723	0,0004995
	Изменение значения среднего арифметического			3,1	0,42		0,012	0,00873

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Изменение значения СКО			3,75	0,8		0,009648	0,008034
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			3,1	0,8		0,013	0,012
Водопоглощение при капиллярном подсосе	НОРМ	0	0,4	0,2	0,067	0,006	0,0003943	0,0002806
	Изменение значения среднего арифметического			0,3	0,067		0,005086	0,004304
	Изменение значения СКО			0,2	0,09		0,001974	0,00164
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического			0,3	0,09		0,006038	0,005496

Т а б л и ц а 4

Достоверность контроля качества в зависимости от состояния технологического процесса производства

Вид контроля	Показатели, характеризующее состояние производства	Риск производителя $\alpha$	Риск потребителя $\beta$	Достоверность
1	2	3	4	5
Входной	Нормативное	0,004524	0,002047	0,993429655
	Изменение значения среднего арифметического	0,047564	0,030693	0,921742924
	Изменение значения СКО	0,042419	0,038098	0,919483784
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического	0,053454	0,04059	0,905955568
Операционный	Нормативное	0,010718	0,006252	0,983030442
	Изменение значения среднего арифметического	0,066815	0,042924	0,890261356
	Изменение значения СКО	0,020039	0,010172	0,969788686
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического	0,066441	0,046813	0,88674633
Приемочный	Нормативное	0,016961	0,002185	0,980854721
	Изменение значения среднего арифметического	0,09209	0,039662	0,868247769
	Изменение значения СКО	0,053917	0,022852	0,923231072

1	2	3	4	5
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического	0,089971	0,058941	0,851088274
Общее	Нормативное	0,017153	0,010452	0,972394582
	Изменение значения среднего арифметического	0,193594	0,004304	0,802102443
	Изменение значения СКО	0,112203	0,06964	0,818157012
	Одновременное изменение значений СКО и среднего арифметического	0,195847	0,139404	0,664749015

Анализ данных, приведенных в табл.1–4, показывает, что достоверность контроля качества ССС при состоянии производства в статистической управляемости и воспроизводимом процессе, т.е. среднее значение показателей качества, находится в середине поля допуска (при этом в поле допуска находятся  $\pm 3\sigma$ ) и составляет  $P=0,972394582$ , т.е. больше нормативного значения  $P=0,95$ .

Изменение значения среднеарифметического, увеличение среднеквадратического отклонения СКО приводят к резкому снижению показателя достоверности контроля, увеличению рисков производителя и потребителя. При одновременном увеличении СКО и изменении среднеарифметического значения показателей качества достоверность контроля качества ССС при заданных значениях составляет  $P=0,664749015$ , риск производителя  $\alpha=0,195847$ , риск потребителя  $\beta=0,139404$ .

Полученные результаты расчетов свидетельствуют о важности точной настройки технологического процесса производства.

#### Список литературы

1. Логанина, В.И. Управление качеством на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, О.В. Карпова, Л.В. Макарова. – М.: АСВ, 2008. – 215 с.
2. Omair, A. Sample size estimation and sampling techniques for selecting a representative sample / A. Omair // Health Spec. – 2014. – No. 2. – P. 142–147.
3. Ramsey, C.A. A methodology for assessing sample representativeness. Scandinavian / C.A. Ramsey, A.D. Hewitt // Journal of Statistics. – 2014. – No. 41 (2). – P. 277–290.
4. Kruskall, W. Representative sampling / W. Kruskall, F. Mosteller // Int. Stat. Rev. – 1979. – No. 47. – P. 13–24.
5. Song, P.S. Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete / P.S. Song, J.C. Wu, S. Hwang, B.C. Sheu // Cement and Concrete Research. – 2005. – No. 35(2). – P. 393–399.
6. Серых, В.И. Многопараметрический контроль продукции: достоверность и затраты / В.И. Серых, С.П. Порватов, В.И. Сединин // Методы менеджмента качества. – 2010. – №5. – С.48–52.
7. Логанина, В.И. Достоверность контроля качества строительных материалов и изделий / В.И. Логанина, А.Н. Круглова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 16–18.
8. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.
9. Рубичев, Н.А. Достоверность допускового контроля качества / Н.А. Рубичев, В.Д. Фрумкин. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 172 с.

10. Loganina, V.I. Quality control of building materials according to uncertainty of measurement and stability of the technological process of production / V.I. Loganina, Yu.P. Skachkov, V.S. Lesovik // *Solid state phenomena*. – 2019. – No. 299. – P. 1161–1165.
11. Lin, M. Research commentary: Too big to fail: large samples and the p-value problem / M. Lin, H.C. Lucas, G. Shmieli // *Inform. Syst. Res.* – 2013. – No. 24. – P. 906–917.
12. Kruskall, W. Representative sampling / W. Kruskall, F. Mosteller // *Int. Stat. Rev.* – 1979. – No. 47. – P. 13–24.
13. Болдырев, И.В. Управление рисками и возможностями в испытательной лаборатории / И.В. Болдырев, Т.Я. Селиванова, В.И. Шевелева // *Стандарты и качество*. – 2018. – №12. – С.4–12.
14. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // *Строительные материалы*. – 2008. – № 8. – С. 98–99.

### References

1. Loganina, V.I. Quality management at construction industry enterprises / V.I. Loganina, O.V. Karpova, L.V. Makarova. – M.: ASV, 2008. – 215 p.
2. Omair, A. Sample size estimation and sampling techniques for selecting a representative sample / A. Omair // *Health Spec.* – 2014. – No. 2. – P. 142–147.
3. Ramsey, C.A. A methodology for assessing sample representativeness. Scandinavian / C.A. Ramsey, A.D. Hewitt // *Journal of Statistics*. – 2014. – No. 41 (2). – P. 277–290
4. Kruskall, W. Representative sampling / W. Kruskall, F. Mosteller // *Int. Stat. Rev.* – 1979. – No. 47. – P. 13–24.
5. Song, P.S. Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete / P.S. Song, J.C. Wu, S. Hwang, B.C. Sheu // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – No. 35(2). – P. 393–399.
6. Serykh, V.I. Multiparametric control of products: reliability and costs / V.I. Serykh, S.P. Porvatov, V.I. Sedinin // *Methods of quality management*. – 2010. – No. 5. – P. 48–52.
7. Loganina, V.I. Reliability of quality control of building materials and products / V.I. Loganina, A.N. Kruglova // *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. – 2014. – No. 2. – P. 16–18.
8. Loganina, V.I. On the issue of regulation of technological processes of concrete production / V.I. Loganina // *Izvestia of higher educational institutions. Building*. – 2009. – No. 3–4 (603–604). – P. 42–45.
9. Rubichev, N.A. Reliability of tolerance quality control / N.A. Rubichev, V.D. Frumkin. – M.: Publishing house of standards, 1990. – 172 p.
10. Loganina, V.I. Quality control of building materials according to uncertainty of measurement and stability of the technological process of production / V.I. Loganina, Yu.P. Skachkov, V.S. Lesovik // *Solid state phenomena*. – 2019. – No. 299. – P. 1161–1165.
11. Lin, M. Research commentary: Too big to fail: large samples and the p-value problem / M. Lin, H.C. Lucas, G. Shmieli // *Inform. Syst. Res.* – 2013. – No. 24. – P. 906–917.
12. Kruskall, W. Representative sampling / W. Kruskall, F. Mosteller // *Int. Stat. Rev.* – 1979. – No. 47. – P. 13–24.
13. Boldyrev, I.V. Risk and Opportunity Management in a Testing Laboratory / I.V. Boldyrev, T.Ya. Selivanova, V.I. Sheveleva // *Standards and Quality*. – 2018. – No. 12. – P.4–12.
14. Loganina, V.I. Organization of statistical acceptance control of the quality of building products and structures / V.I. Loganina // *Construction Materials*. – 2008. – No. 8. – P. 98–99.

УДК 625.8:691

*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

**Грачева Юлия Вячеславовна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Геотехника и дорожное  
строительство»  
E-mail: gds@pguas.ru

**Тарасеева Нелли Ивановна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Геотехника и дорожное  
строительство»  
E-mail: gds@pguas.ru

**Иванов Никита Михайлович,**  
магистрант

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Gracheva Yulia Vyacheslavovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Geotechnics and road  
construction construction»  
E-mail: gds@pguas.ru

**Taraseeva Nelli Ivanovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Geotechnics and Road  
Construction»  
E-mail: gds@pguas.ru

**Ivanov Nikita Mikhailovich,**  
Undergraduate

## ДЛИТЕЛЬНАЯ ВОДОСТОЙКОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Ю.В. Грачева, Н.И. Тарасеева, Н.М. Иванов

Определена возможность расширения сырьевой базы строительных материалов за счет использования местного сырья, в частности песчаников, дацита, тонкомолотого шлака, с целью наращивания применения силицитовых материалов в строительстве. Дана оценка длительной водостойкости геосинтетического вяжущего, модифицированного реакционно-активными по отношению к кремнекислоте добавками, путем длительного экспонирования образцов в воде в течение 150 суток. Экспериментальная часть представлена 15 комбинациями составов. Установлено, что несмотря на понижение прочности некоторых образцов из комплекса двух тонкомолотых горных пород, отмечается повышение водостойкости геосинтетических вяжущих. Предложены рекомендации по применению полученных модифицированных материалов для объектов дорожно-строительной отрасли с целью улучшения устойчивости к агрессивным средам и химическим воздействиям, возникающим в процессе строительства и эксплуатации. Результаты исследований направлены на решение задач замены цемента в производстве строительных материалов и изделий, вовлечения в стройиндустрию местного сырья и отсевов камнедробления, а также проблем экологии.

*Ключевые слова: геосинтетическое вяжущее, длительная водостойкость, добавка-модификатор, кремниевая кислота, дорожное строительство*

## LONG-TERM WATER RESISTANCE OF MODIFIED GEOSYNTHETIC BINDERS FOR ROAD CONSTRUCTION

Yu.V. Gracheva, N.I. Taraseeva, N.M. Ivanov

The possibility of expanding the raw material base of construction materials due to the use of local raw materials, in particular, sandstones, dacite, fine-wound slag in order to increase the use of silicite materials in construction is determined. The paper estimates the long-term water resistance of a geosynthetic binder modified by additives reactive to silicic acid by long-term exposure of samples in water for 150 days. The experimental part is represented by 15 combinations of compositions. It is found that despite the decrease of strength in some samples from the complex of two fine-ground rocks, there is an increase of water resistance of geosynthetic binders. Recommendations for the use of the obtained modified materials for road construction facilities are proposed in order to improve their resistance to aggressive environments and chemical influences that occur during construction

and operation. The results of the research can be used in solving the problems of replacing cement in the production of building materials and products, involving local raw materials in construction industry as well as solving environmental problems.

*Keywords: geosynthetic astringent, long-term water resistance, additive-modifier, silicic acid, road construction*

В последние годы в строительной отрасли широко применяют геосинтетические материалы; в дорожном строительстве – для армирования земляного полотна, изменения характеристик фильтрации, дренажа, упрочнения грунта, предотвращения эрозии, усиления прочности слоёв дорожной одежды, гидроизоляции. Применение модифицированных материалов в данной отрасли позволяет улучшать технологические и эксплуатационные характеристики конструктивных элементов автомобильных дорог, в частности устойчивость к агрессивным средам и химическим воздействиям, изменениям температурно-влажностных условий строительства и эксплуатации объекта, немаловажным является также продление срока их службы. Для получения наилучшего эффекта применяют сочетание горных пород, шлаковых композиций, геосинтетических материалов, что позволяет решать многие технические проблемы [1...4].

Как показывают опыты, ряд горных пород (молотый гравий, базальт, диорит, сиенит), не отвердевающих в щелочных условиях, тем не менее формируют в присутствии малых добавок шлака твердеющие структуры. Результаты исследований позволили выявить ряд горных пород осадочного происхождения, которые под действием малых добавок шлака, не превышающих 20 %, и низких дозировок щелочей NaOH или KOH способны к формированию контактно-метасоматических структур [5, 6]. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что шлак в малых добавках действует не как основное цементирующее вяжущее, а как добавка, продукты гидратации которой вступают в реакцию с растворенными щелочью веществами породы или являются инициатором или катализатором отвердевания некоторых горных пород. Таким образом, теоретические представления В.Д. Глуховского [7] о том, что гидратация шлакощелочных вяжущих через растворение шлака нереальна, требуют конкретного научного обоснования.

Топологические расчеты взаимного расположения частиц шлака, взятого в количестве 10–20 %, и частиц более дисперсной породы, количество которой составляет 80–90 %, показывают, что на 1 частицу шлака приходится около 500–1000 частиц породы или более в зависимости от её дисперсности. Каждая частица шлака отделена от соседней топологическим твердофазным барьером, состоящим из достаточно большого числа частиц высокодисперсной породы. При дискретном расположении отдельных частиц шлака в непрерывной матрице из частиц породы отверждение такого композиционного вяжущего невозможно без цементации неотверждающейся матрицы. Развитие магистральных трещин при разрушении должно проходить перколяционно по матрице. А если матрица в присутствии щелочи не затвердевает без добавки шлака, то прочность должна быть близка к нулевой. Реально же малошлаковые композиции при нормальных условиях хотя и имеют невысокую прочность, многократно повышают ее при сухом прогреве при  $t=150\text{--}250^\circ\text{C}$ . Дискретные шлаковые частицы, не имея между собой контактных взаимодействий, участвуют в образовании связующего вещества для цементирования многочисленных контактов между частицами породы. Механизм такого цементирования требует выяснения и подробного изучения. Нельзя не принимать во внимание и воздействие высокомолярного раствора щелочи на растворение составляющих горных пород при повышенной температуре. Установлено, в присутствии малых добавок шлака из силицитовых композиций можно получать особовысокопрочные материалы, подвергая их низкотемпературному сухому прогреву при температуре  $t=150\text{--}250^\circ\text{C}$ .

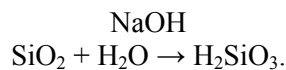
В работе [6] рассмотрено воздействие щелочей на силицитовые породы, модификационный ряд которых достаточно широк. Термин «силициты» интегрирует все высококремнеземистые породы, состоящие в большинстве из свободного кремнезема в различных полиморфных модификациях. Изменение минеральной формы кремне-



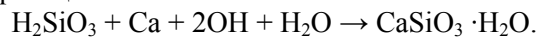
зема влияет на процесс раскristаллизации. Главными факторами, влияющими на степень и характер раскristаллизации, являются время и глубина залегания (геотермический градиент). В ряду кремнезёмов:  $\alpha$ -кварц,  $\beta$ -кварц,  $\alpha$ -тридимит,  $\beta$ -тридимит,  $\alpha$ -кristобалит,  $\beta$ -кristобалит, отличающихся богатством полиморфных разновидностей, даже у безводных модификаций  $\text{SiO}_2$  истинная плотность может существенно варьироваться от 2,192 до 2,648 г/см<sup>3</sup>. Эти полиморфные модификации встречаются в широко распространённых и разнообразных по внешнему облику формах кремнезёма, известных под названием опал.

Нет ясности в морфологии кремния (природная порода), поскольку чрезвычайно разнообразна морфология вулканических кремнезёмистых стекол и пеплов. Существенные отличия наблюдаются в составе кремнезёмистых песчаников, а точнее их цементирующего вещества. Химическая активность алеволито-песчаных пород хотя и зависит от их минералогического и петрографического состава, в целом песчаники характеризуются высоким содержанием кремнезёма.

По-видимому, высокоактивное цементирующее вещество песчаников – это опал, халцедон, т.к. они способны на первом этапе в щелочных условиях поставлять кремнекислоту по схеме



Образующаяся высокоактивная кремнекислота способна вступать во взаимодействие с диссоциированной гидролизной известью с образованием гидросиликатов кальция по следующей реакции:



При этом щелочной активизатор, не расходуясь в этом реакционном порошке, может активизировать и растворение шлакового стекла с образованием гидросиликатов натрия.

Установлена повышенная реакционная способность стекловидных промышленных отходов и горных пород, подвергнутых термической обработке. Резкое увеличение активности продуктов спекания и плавления объясняется не только аморфизацией кристаллических компонентов исходного сырья, но и высокотемпературными фазовыми переходами  $\text{SiO}_2$  из устойчивого  $\beta$ -кварца в  $\alpha$ -кварц, кристобалит и тридимит. Определена сравнительная растворимость кварца, высокотемпературных модификаций кремнезёма (кristобалита, тридимита), аморфной кремнекислоты (кварцевого песка) и водной кремнекислоты (опала) при температурах 20, 100 и 175 °С в нейтральной и щелочной средах при продолжительности контакта кремнезёма с жидкой средой в течение 8 часов. Превалирующее влияние на растворимость безводных модификаций  $\text{SiO}_2$  в неравновесных условиях оказывает плотность упаковки тетраэдров  $\text{SiO}_2$  в их решетке, за счёт чего легче и быстрее происходит гидратация кремнезёма с последующим переходом в раствор.

Использование высокопористых опаловидных кремнезёмов в значительных количествах, достигающих 20–30 % от массы цемента, неоправданно для того, чтобы реализовать лишь одно, хотя и достаточно эффективное функциональное свойство, – высокую водостойкость при использовании бетонов на пуццолановых цементах в наземных сооружениях, в том числе в дорожном строительстве. В минерально-шлаковых композиционных вяжущих доля портландита, выделяющегося из силикатов и алюмосиликатов кальция шлака, значительно ниже, чем из портландцемента. Образующаяся кремнекислота при воздействии щелочи на активные кремнезёмы, содержащиеся в кварцевых песчаниках, цементированных высокоактивным опаловидным или полукристаллическим кремнезёмом, превращается в силикаты кальция, высвобождая щелочь для реакционной активности шлака. Этот процесс требует подробного изучения.

Поскольку нет ясности в совместимости шлаков и глауконитовых песчаников, в то время как глауконит  $4[(\text{K}, \text{Na}) \cdot (\text{Al}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2 \cdot (\text{AlSiO})_4 \cdot \text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_2]$ , который цементирует песчаники, содержит в своем составе минимум 12 % щелочных компонентов, необходимо выяснить, идет ли реакционный процесс между глауконитом и продук-

тами гидратации шлака и щелочи. Важно определить совместимость шлаков и глауконитовых песчаников.

Для реализации поставленной задачи проведены исследования изучения твердения шлака с добавками щелочных активизаторов в композициях с осадочными породами и оценки длительной водостойкости полученных композитов. Были изготовлены образцы-цилиндры диаметром и высотой 20 мм из геосинтетических вяжущих методом силового прессования при давлении 25 МПа и влажности смеси 14 %. В эксперименте использовали два вида песчаников Пензенского месторождения – кремнеземистый и глауконитовый. В качестве добавки-модификатора использовали тонкомолотый шлак в количестве 20 %, вулканический дацит 50 %, аплит-гранит 50 %, комплексы «тонкомолотый шлак 20 % + гидроксид алюминия 5 %», «тонкомолотый шлак 20 % + вулканический дацит 50 %», «тонкомолотый шлак 20 % + гидроксид алюминия 5 % + вулканический дацит 50 %», «тонкомолотый шлак 20 % + аплит-гранит 50 %», «тонкомолотый шлак 20 % + гидроксид алюминия 5 % + вулканический дацит 50 %». Оксиды алюминия, железа, магния и кремния, содержащиеся в глауконите, могут быть реакционно-активными в шлако-щелочной среде. Поэтому выясняли, идет ли реакционный процесс между глауконитом и продуктами гидратации шлака и щелочи в присутствии NaOH (в состав добавляли 7 % от массы вяжущего). Отформованные образцы после выдержки в течение 1 суток в воздушно-влажностных условиях подвергались тепловой обработке по следующему режиму: подъем температуры в течение 4 часов, изотермическая выдержка при  $t_{из} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  – 6 часов, естественное остывание – 4 часа. Составы смесей и результаты эксперимента приведены в таблице.

Выводы по результатам исследований, приведенных в таблице, следующие: практически все добавки понижают прочность при сжатии в сравнении с контрольными бездобавочными составами, но степень уменьшения прочности у различных добавок неодинакова. Наиболее сильное снижение прочности (более чем в 2 раза) наблюдается у образцов из смеси «песчаник + дацит». Образцы из вяжущего на основе смеси песчаника с аплит-гранитом в наименьшей степени понижают свою прочность по сравнению с образцами из чистого песчаника, но они становятся совершенно водостойкими. Дацит в композиционных составах с песчаниками существенно снижает цементирующее действие кремнекислоты вследствие образования менее прочных соединений с ней. Образцы из песчаников являются наименее водостойкими (составы 1, 10 в таблице).

Однако несмотря на понижение прочности образцы из комплекса двух тонкомолотых горных пород – песчаника и дацита – смеси песчаника с добавкой тонкомолотого шлака и гидроксида алюминия и смеси песчаника и дацита с добавкой тонкомолотого шлака и гидроксида алюминия способствуют повышению водостойкости геосинтетических вяжущих. Коэффициент длительной водостойкости через 150 суток нахождения в воде при температуре 20 °C образцов на основе геосинтетического вяжущего, модифицированного комплексной добавкой «тонкомолотый шлак + гидроксид алюминия», снизился до 0,61–0,89 в зависимости от вида песчаника, но при более длительном хранении стабилизировался на одном уровне. Это свидетельствует о прекращении воздействия воды на растворение менее водостойких цементирующих веществ.

Коэффициент водостойкости образцов, модифицированных дацитом, через 150 суток экспонирования в воде имеет высокие значения – для архангельского песчаника он равен 1,03 (состав 4, см. таблицу), для глауконитового – 1,02 (состав 13, см. таблицу). Коэффициент водостойкости образцов, модифицированных дацитом и добавкой тонкомолотого шлака и гидроксида алюминия, через 150 суток насыщения в воде имеет более высокие значения – для архангельского песчаника – 1,07–1,1 (составы 5, 6, см. таблицу), для глауконитового песчаника – 1,03–1,09 (составы 14, 15, см. таблицу).

Длительная водостойкость геосинтетических вяжущих  
при различных дозировках добавок-модификаторов

№ состава	Соотношение компонентов вяжущего, %	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Средняя прочность при сжатии, МПа, после тепловой обработки при $t_{из}=200^{\circ}\text{C}$	Средняя прочность при сжатии, МПа, образцов подвергнутых ТО при $t_{из}=200^{\circ}\text{C}$ после водонасыщения в течение		Коэффициент водостойкости $K_v$ после тепловой обработки при $t_{из}=200^{\circ}\text{C}$ через	
				2 суток	150 суток	2 суток	150 суток
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Песчаник архангельский – 100	1955	131,2	89,2	0	0,68	Образцы саморазрушились
2	Песчаник архангельский – 80, шлак Липецкий – 20	1930	84,5	75,2	65,9	0,89	0,78
3	Песчаник архангельский – 75, шлак Липецкий – 20, Al(OH) <sub>3</sub> – 5	1910	72,8	68,4	62,6	0,94	0,86
4	Песчаник архангельский – 50, дацит – 50	1860	57,4	52,8	59,1	0,92	1,03
5	Песчаник архангельский – 50, дацит – 50, шлак Липецкий – 20	1840	52,1	49,0	55,7	0,94	1,07
6	Песчаник архангельский – 50, дацит – 50, шлак Липецкий – 20, Al(OH) <sub>3</sub> – 5	1820	49,7	48,2	54,7	0,97	1,1
7	Песчаник архангельский – 50, аплит-гранит – 50	1930	91,9	19,3	8,3	0,21	0,09
8	Песчаник архангельский – 50, аплит-гранит – 50, шлак Липецкий – 20	1900	78,1	48,4	17,2	0,62	0,22
9	Песчаник архангельский – 50, аплит-гранит – 50, шлак Липецкий – 20, Al(OH) <sub>3</sub> – 5	1870	74,3	50,5	21,5	0,68	0,29
10	Песчаник глауконитовый – 100	1910	89,8	65,6	0	0,73	Образцы саморазрушились

1	2	3	4	5	6	7	8
11	Песчаник глауконитовый – 80, шлак Липецкий – 20	1890	73,2	63,0	44,7	0,86	0,61
12	Песчаник глауконитовый – 75, шлак Липецкий – 20, Al(OH) <sub>3</sub> – 5	1800	36,7	33,4	22,4	0,91	0,89
13	Песчаник глауконитовый – 50, дацит – 50	1815	50,4	44,4	51,4	0,88	1,02
14	Песчаник глауконитовый – 50, дацит – 50 шлак Липецкий – 20	1800	44,2	40,2	45,5	0,91	1,03
15	Песчаник глауконитовый – 50, дацит – 50 шлак Липецкий – 20 Al(OH) <sub>3</sub> – 5	1780	41,1	37,8	44,8	0,92	1,09

Следует отметить и тот факт, что у образцов (составы 4, 5, 6, 13, 14, 15, см. таблицу) через 150 суток экспонирования в воде при температуре 20°C наблюдается стабилизация прочностных показателей и значений коэффициентов длительной водостойкости.

Таким образом, исходя из результатов оценки водостойкости, можно прийти к выводу, что кремнеземистый и глауконитовый песчаники, модифицированные комплексной добавкой липецкого шлака и Al(OH)<sub>3</sub> (составы 3 и 12), могут быть использованы для изготовления воздушных вяжущих и материалов на их основе. Смеси «песчаник + дацит» и «песчаник + дацит + тонкомолотый шлак + гидроксид алюминия» пригодны для получения гидравлических вяжущих веществ (это составы 4, 5, 6, 13, 14 и 15, см. таблицу). Модификация силицитощелочных вяжущих перечисленными выше добавками повышает длительную водостойкость и расширяет сферы применения силицитовых материалов в строительстве.

В связи с этим перспективными являются горные породы, содержащие в своем составе кальциевые полевошпатовые породы, например молотые базальты, и бесполевошпатовые породы – дуниты. Известно применение базальтовых материалов при выполнении строительных и дорожно-строительных работ в виде базальтовой сетки, в составе геосетки и другие варианты, как правило, за счет основной характеристики данных пород – прочности. Подобные современные материалы позволяют придать конструкции высокую прочность и ударную вязкость за счёт свойства кремнезёма выступать в качестве прочного связующего вещества.

Результаты анализа химических компонентов и их соединений в составе различных композиций позволяют рекомендовать рассмотренные горные породы в качестве модифицирующих компонентов при строительстве, например, земляного полотна, поскольку, как говорилось выше, исследуемые составы повышают водостойкость. Плотность и прочность земляного полотна автомобильной дороги, построенной, как правило, из местных горных пород, обеспечиваются соблюдением технологии на стадии возведения и уплотнения. Однако наличие пор между частицами грунта может приводить к его естественному увлажнению. Применение силицитощелочных вяжущих, модифицированных перечисленными в данной статье добавками, улучшает водостойкость основания насыпи, особенно в пониженных местах проложения трассы автомобильной дороги, что подтверждает практическую значимость выполненных исследований.

## Список литературы

1. Калашников, В.И. Экспресс-метод для оперативного прогноза длительной водостойкости геосинтетических и геослаковых вяжущих / В.И. Калашников, Ю.В. Грачева, Е.Ю. Миненко // Вестник Государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 30. – С. 162–168.
2. Высоцкая, М.А. Молимермодифицированные материалы для дорожно-строительной отрасли / М.А. Высоцкая, Д.А. Кунецов, С.Ю. Русина // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений: сборник материалов. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. – С. 91–95.
3. Морев, М.И. Современные технологии обогащения зернистых материалов / М.И. Морев, А.С. Сарвас, С.А. Дергунов // Тенденции развития науки и образования. – 2016. – № 13–3. – С. 12–16.
4. Тарасеева, Н.И. Твердение цементных композиций с добавками на основе отходов предприятий энергетики / Н.И. Тарасеева, А.В. Воскресенский, С.А. Киселева // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5–2 (38). – С. 382–385.
5. Калашников, В.И. Особенности оценки длительной водостойкости геосинтетического вяжущего, модифицированного реакционно-активными добавками / В.И. Калашников, Ю.В. Грачева, В.Н. Блясов // Приволжский научный журнал. – 2012. – №1. – С. 62–66.
6. Грачева, Ю.В. Теоретические и технологические аспекты получения низкощелочных геосинтетических вяжущих и развитие методологии оценки их долговечности: моногр. / Ю.В. Грачева. – Пенза: ПГУАС, 2020 – 160 с.
7. Глуховский, В.Д. Вяжущее и композиционные материалы контактного твердения: монография / В.Д. Глуховский, Р.Ф. Рунова, С.Е. Максунув. – Киев: Вища школа, 1991. – 243 с.

## References

1. Kalashnikov, V.I. Express method for operational forecast of long-term water resistance of geosynthetic and geo-slag binders / V.I. Kalashnikov, Yu.V. Gracheva, E.Yu. Minenko // Bulletin of the State University of architecture and civil engineering. Series: Construction and architecture. – 2013. – No. 30. – P. 162–168.
2. Vysotskaya, M.A. Molimermodifitsirovannye materials for the construction industry / M.A. Vysotskaya, D.A. Kunetsov, S.Yu. Rusina // Innovative materials, technologies and equipment for the construction of modern transport structures: collection of materials. – Belgorod: BSTU named after V. G. Shukhov, 2013. – P. 91–95.
3. Morev, M.I. Modern technologies for the enrichment of granular materials / M.I. Morev, A.S. Sarvas, S.A. Dergunov // Trends in the development of science and education. – 2016. – No. 13–3. – P. 12–16.
4. Taraseeva, N.I. Hardening of cement compositions with additives based on waste from energy enterprises / N.I. Taraseeva, A.V. Voskresensky, S.A. Kiseleva // Izvestiya Yugo-ZAPADNOGO gosudarstvennogo universiteta. – 2011. – № 5–2 (38). – P. 382–385.
5. Kalashnikov, V.I. Features of assessment of long-term water resistance of geosynthetic binder modified with reactive additives / V.I. Kalashnikov, Yu.V. Gracheva, V.N. Blyasov // The Privolzhsky scientific journal. – 2012. – No. 1. – P. 62–66.
6. Gracheva, Yu.V. Theoretical and technological aspects of obtaining low-alkaline geosynthetic binders and the development of the methodology for assessing their durability: monograph / Yu.V. Gracheva. – Penza: PGUAS, 2020 – 160 p.
7. Gluhovsky, V.D. Binder and composite materials of contact hardening: monography / V.D. Gluhovsky, R.F. Runova, S.E. Maksunov. – Kiev: Vosti School, 1991. – 243 p.

УДК 697.147, 699.86

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

**Фролов Михаил Владимирович**,  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры  
«Теплогазоснабжение и вентиляция»  
E-mail: mihail-frolovv@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

**Frolov Mikhail Vladimirovich**,  
Candidate of Sciences, Senior Lecturer of the  
department «Heat, gas supply and  
ventilation»  
E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ ФАСАДНЫХ КРАСОК НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В НАРУЖНЫХ СТЕНАХ

В.И. Логанина, М.В. Фролов

Приведены результаты исследования закономерности влажностного режима в стенах, окрашенных различными видами фасадных красок. В качестве основных материалов стен использованы: газобетон марок D400, D600, кирпич и керамзитобетон, в качестве утеплителей использованы: минеральная вата и пенополистирол. Оценено влияние паропроницаемости красок на температуру начала конденсации в различных ограждающих конструкциях. Даны рекомендации по выбору вида краски для стен различных конструкций.

*Ключевые слова: краска, влажностный режим, конденсация влаги, газобетон, керамзитобетон, кирпич*

## EVALUATION OF THE INFLUENCE OF FACADE PAINTS VAPOR PERMEABILITY ON THE CHANGE OF HUMIDITY REGIME IN EXTERNAL WALLS

V.I. Loganina, M.V. Frolov

The regularities of the humidity regime in the walls painted by various types of facade paints have been investigated. The main materials of the walls were: aerated concrete of grades D400, D600, brick and expanded clay concrete, as insulation materials: mineral wool and expanded polystyrene were used. The influence of the vapor permeability of paints on the temperature of condensation onset in various enclosing structures is estimated. Recommendations for choosing the type of walls paint of various designs are given.

*Keywords: paint, humidity conditions, moisture condensation, aerated concrete, expanded clay concrete, brick*

Фасадные краски находят широкое применение при строительстве вновь возводимых и реконструкции уже построенных зданий [1–3]. При выборе вида краски важно учитывать ее природу и паропроницаемость.

Конденсация влаги является одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации зданий различного назначения [4, 5]. В конструкции наружного ограждения для минимизации количества конденсирующейся влаги каждый последующий

слой в направлении от внутреннего к наружному должен характеризоваться большей паропроницаемостью и меньшей теплопроводностью по сравнению с предыдущим слоем [6–8].

Для оценки вероятности конденсации влаги в наружных ограждениях определяли температуру начала конденсации  $t_{нк}$  [9–11]. Температура начала конденсации – температура наружного воздуха, при понижении до которой в ограждающей конструкции возникают условия для образования конденсата.

Нами получены результаты оценки влияния различных фасадных красок на изменение влажностного режима в стенах различной конструкции для условий г. Пензы.

Расчетные параметры наружного воздуха приняты в соответствии с требованиями «СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99»:

- средняя температура отопительного периода  $t_{оп} = -4,1$  °С;
- продолжительность отопительного периода  $z_{от} = 200$  сут;
- средняя влажность наиболее холодного месяца  $\varphi_{х.м.} = 83$  %.

Расчетные параметры внутреннего воздуха приняты по «СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» для жилых зданий:

- расчетная температура внутреннего воздуха  $t_{в} = 20,0$  °С;
- относительная влажность внутреннего воздуха  $\varphi_{в} = 55$  %.

Расчетные схемы исследуемых конструкций стен представлены на рис. 1.

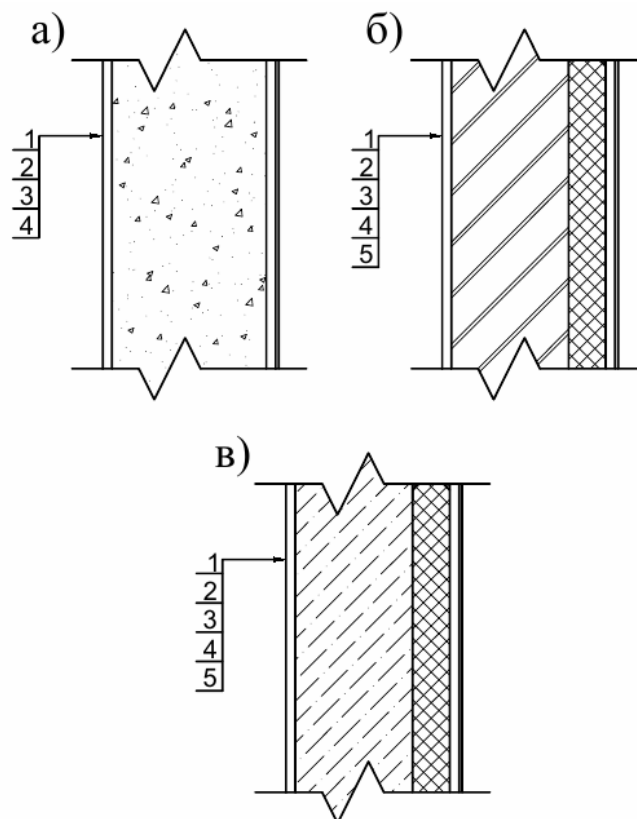


Рис. 1. Расчетная схема ограждающих конструкций:  
а – конструкции 1, 2; б – конструкции 3, 4; в – конструкции 5, 6

Конструктивное исполнение исследуемых ограждающих конструкций и расчетные значения коэффициентов теплопроводности и коэффициентов паропроницаемости исследуемых материалов представлены в таблице.

## Характеристики используемых в рассматриваемых ограждающих конструкциях материалов

Номер слоя	Материал	Толщина слоя $\delta$ , м	Средняя плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda_A$ , Вт/(м·К)	Коэффициент паропроницаемости $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
<b>Конструкция 1</b>					
1	Штукатурка цементно-шлаковая	0,01	1200	0,470	0,140
2	Газобетон D400	0,45	400	0,14	0,230
3	Штукатурка цементно-вермикулитовая	0,02	600	0,13	0,25
4	Фасадная краска	0,0002	В зависимости от вида краски		
<b>Конструкция 2</b>					
1	Штукатурка цементно-шлаковая	0,01	1200	0,470	0,140
2	Газобетон D600	0,65	600	0,22	0,170
3	Штукатурка цементно-вермикулитовая	0,02	600	0,13	0,25
4	Фасадная краска	0,0002	В зависимости от вида краски		
<b>Конструкция 3</b>					
1	Штукатурка цементно-песчаная	0,01	1800	0,76	0,09
2	Кирпич глиняный	0,51	1800	0,70	0,11
3	Пенополистирол	0,10	40	0,04	0,05
4	Штукатурка цементно-песчаная	0,01	1800	0,76	0,09
5	Фасадная краска	0,0002	В зависимости от вида краски		
<b>Конструкция 4</b>					
1	Штукатурка цементно-песчаная	0,01	1800	0,76	0,09
2	Кирпич глиняный	0,51	1800	0,70	0,11
3	Маты минераловатные	0,10	125	0,045	0,30
4	Штукатурка цементно-песчаная	0,01	1800	0,76	0,09
5	Фасадная краска	0,0002	В зависимости от вида краски		
<b>Конструкция 5</b>					
1	Штукатурка цементно-песчаная	0,01	1800	0,76	0,09
2	Керамзитобетон	0,51	1200	0,44	0,11
3	Пенополистирол	0,10	40	0,04	0,05
4	Штукатурка цементно-песчаная	0,01	1800	0,76	0,09
5	Фасадная краска	0,0002	В зависимости от вида краски		
<b>Конструкция 6</b>					
1	Штукатурка цементно-песчаная	0,01	1800	0,76	0,09
2	Керамзитобетон	0,51	1200	0,44	0,11
3	Маты минераловатные	0,10	125	0,041	0,40
4	Штукатурка цементно-песчаная	0,01	1800	0,76	0,09
5	Фасадная краска	0,0002	В зависимости от вида краски		

В качестве фасадной краски использованы краски 6 видов:

- краска с повышенной адгезией и водостойкостью для окраски цоколей зданий ВАК «Цоколь», коэффициент паропроницаемости  $\mu=0,00026$  мг/(м·ч·Па);
- краска на основе акрилат-стирольных латексов ВАК «Акрил 1», коэффициент паропроницаемости  $\mu=0,00038$  мг/(м·ч·Па);
- краска на основе акрилат-стирольных латексов ВАК «Акрил 2», коэффициент паропроницаемости  $\mu=0,00047$  мг/(м·ч·Па);



- краска, содержащая в составе силиконовую эмульсию ВАК «Силикон 1», коэффициент паропроницаемости  $\mu=0,00070$  мг/(м·ч·Па);
- краска, содержащая в составе силиконовую эмульсию ВАК «Силикон 2», коэффициент паропроницаемости  $\mu=0,00148$  мг/(м·ч·Па);
- краска латексно-силикатная ВАК «Силикат», коэффициент паропроницаемости  $\mu=0,00238$  мг/(м·ч·Па).

Также определялся влажностный режим в ограждающих конструкциях, не окрашенных краской.

Все исследуемые конструкции соответствуют требованиям «СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003».

Наибольшее количество конденсата выпадает в стене за 3 зимних месяца, для которых характерны наиболее низкие температуры. Для Пензы средняя температура наружного воздуха декабря  $t_{дек} = -7,8$  °С; средняя температура января  $t_{январь} = -9,8$  °С; средняя температура февраля  $t_{дек} = -9,7$  °С. Для удобства определим среднюю температуру наружного воздуха для всего зимнего периода  $t_{зима} = -8,4$  °С. В ходе исследований будем сравнивать температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  в исследуемых ограждениях с данным значением. Если температура начала  $t_{н.к.}$  в ограждении будет ниже температуры  $t_{зима}$  или незначительно выше, можно предположить, что в процессе эксплуатации в ограждении не накопится критическое количество влаги. Следовательно, исследуемую конструкцию можно рекомендовать окрашивать данным видом краски в условиях города Пензы.

Зависимости температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  от вида фасадной краски в ограждающих конструкциях из газобетона (конструкции 1, 2) представлены на рис. 2.

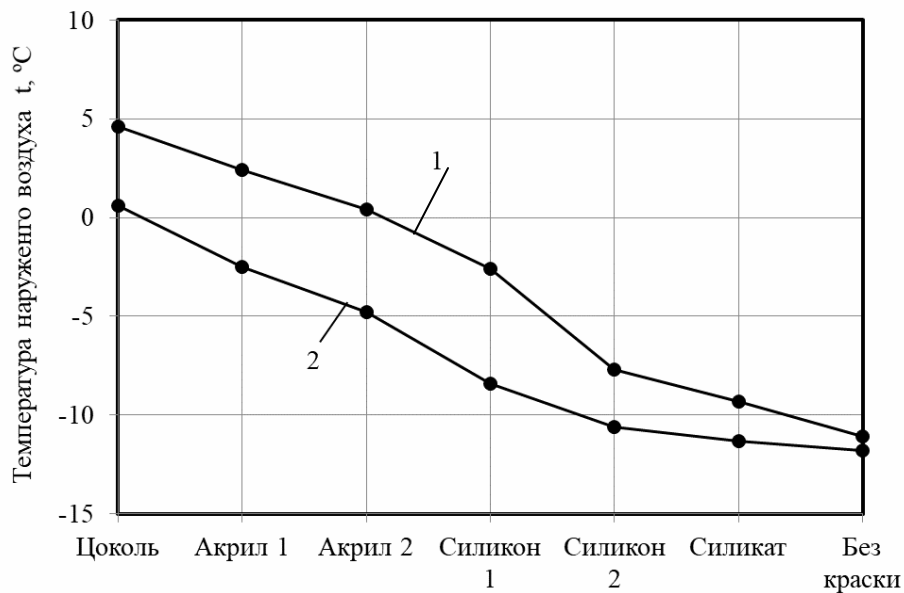


Рис. 2. Зависимость температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  в ограждающих конструкциях из газобетона от вида фасадной краски:  
1 – конструкция 1; 2 – конструкция 2

Установлено, что при использовании фасадных красок в ограждающей конструкции 1 из газобетона марки D400 конденсация влаги начинается при сравнительно высоких температурах наружного воздуха, изменяющихся в зависимости от вида краски в пределах от 4,6 °С до -9,3 °С (рис. 2, кривая 1). Использование фасадных красок для окрашивания стен из газобетона марок D400 ухудшает влажностный режим в ограждении. При использовании красок марки ВАК «Силикат» и ВАК «Силикон 2» температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  равны соответственно -9,6 °С и -7,7 °С, что на 1,5 °С и 3,4 °С выше температуры начала конденсации в ограждении без фасадной краски. Данные краски можно рекомендовать для использования при окраске стен из газобетона марок D400.

При повышении плотности газобетона до марки D600 температура начала конденсации понижается в ограждениях с использованием всех видов рассматриваемых красок (рис. 2, кривая 2). При использовании красок марок ВАК «Силикат», ВАК «Силикон 2» и ВАК «Силикон 1» температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  равны соответственно  $-11,3$  °С,  $-10,6$  °С и  $-8,4$  °С. Данные краски можно рекомендовать для использования при окраске стен из газобетона марок D600.

Зависимости температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  от вида фасадной краски в ограждающих конструкциях из кирпича (конструкции 3, 4) представлены на рис. 3.

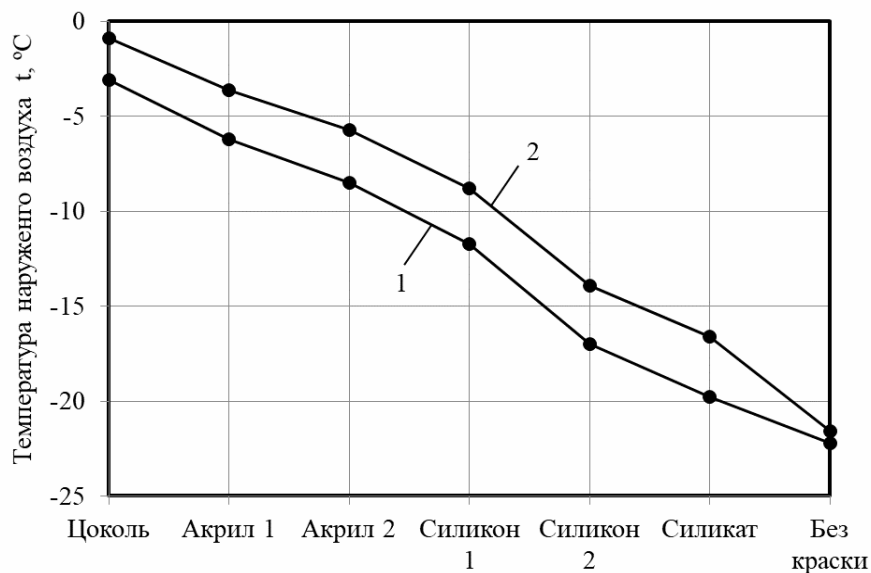


Рис. 3. Зависимость температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  в стенах из кирпича от вида фасадной краски:  
1 – конструкция 3; 2 – конструкция 4

Анализируя рис. 3, можно заметить, что вид используемого в ограждении утеплителя и его характеристики влияют на температуру начала конденсации  $t_{н.к.}$ . Температура начала конденсации  $t_{н.к.}$  в ограждениях, в которых в качестве утеплителя использована минеральная вата, выше на  $2,2$ – $3,1$  °С температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  в ограждениях, в которых в качестве утеплителя использован пенополистирол (рис. 3, кривые 1, 2). Это связано с высокой паропроницаемостью минеральной ваты по сравнению с паропроницаемостью пенополистирола.

Краски марок ВАК «Силикат», ВАК «Силикон 2» и ВАК «Силикон 1» можно рекомендовать для покраски стен из кирпича независимо от вида используемого утеплителя. Краску марки ВАК «Акрил 2» можно рекомендовать для покраски стен из кирпича при использовании в качестве утеплителя пенополистирола.

Зависимости температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  от вида фасадной краски в ограждающих конструкциях из керамзитобетона (конструкции 5, 6) представлены на рис. 4.

Сравнивая рис. 3 и 4, очевидно, что температуры начала конденсации в ограждениях из керамзитобетона выше температур начала конденсации в ограждениях из кирпича при использовании одинаковых по виду фасадных красок. Это связано с меньшей, по сравнению с кирпичом, теплопроводностью керамзитобетона. При этом вид используемого в ограждении утеплителя в ограждениях из керамзитобетона более значительно влияет на температуру начала конденсации  $t_{н.к.}$ . Температура начала конденсации  $t_{н.к.}$  в ограждениях, в которых в качестве утеплителя использована минеральная вата, выше на  $3,2$ – $4,6$  °С температуры начала конденсации  $t_{н.к.}$  в ограждениях, в которых в качестве утеплителя использован пенополистирол (рис. 4, кривые 1, 2).

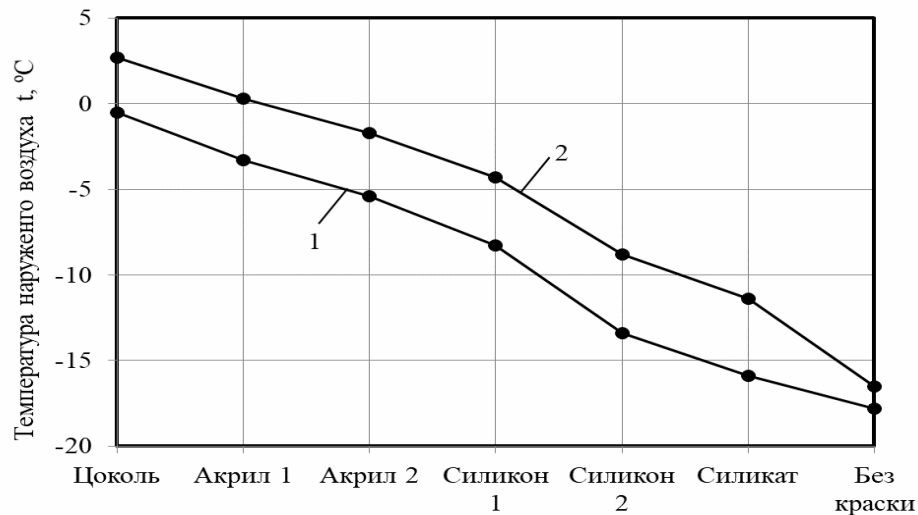


Рис. 4. Зависимость температуры начала конденсации  $t_{н.к}$  в стенах из керамзитобетона от вида фасадной краски:

1 – конструкция 5; 2 – конструкция 6

Краски марок ВАК «Силикат», ВАК «Силикон 2» можно рекомендовать для покраски стен из керамзитобетона независимо от вида используемого утеплителя. Краску марки ВАК «Силикон 1» можно рекомендовать для покраски стен из керамзитобетона при использовании в качестве утеплителя пенополистирола.

#### Выводы

1. Получены закономерности, отражающие зависимость влажностного режима в стенах различных конструкций от вида фасадных красок.
2. Установлено, что в ограждающих конструкциях из керамзитобетона и кирпича при использовании в качестве утеплителя пенополистирола температура начала конденсации  $t_{н.к}$  ниже по сравнению с  $t_{н.к}$  в ограждающих конструкциях, в которых в качестве утеплителя использована минеральная вата.
3. Даны рекомендации по выбору вида фасадной краски для стен различных конструкций.

#### Список литературы

1. Соков, В.Н. Фасадная негорючая краска на основе калиевого жидкого стекла: особенности состава / В.Н. Соков, С.И. Баженова, М.А. Петров, А.Ю. Пепеляева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – №1. – С.33–38.
2. Бусоло, Ф. Фасадные краски с неорганическими колорантами / Ф. Бусоло // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2016. – №7–8. – С.18–21.
3. Иващенко, Ю.Г. Анализ стирол-акриловых дисперсий как связующих для красок строительного назначения / Ю.Г. Иващенко, Н.Н. Фомина, А.Р. Исмагилов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – №1. – С.6–11.
4. Логанина, В.И. Оценка влияния отделочных покрытий на изменение влажностного режима газобетонной ограждающей конструкции / В.И. Логанина, М.В. Фролов, Ю.П. Скачков // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, №11. – С.1349–1356.
5. Корниенко, С.В. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – №6. – С.19–33.
6. Логанина, В.И. Влияние теплоизоляционной штукатурки на основе известково-перлитового состава на влажностный режим наружных стен зданий / В.И. Логанина, М.В. Фролов, А.Д. Рыжов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С.44–47.

7. Ватин, В.И. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков / В.И. Ватин, А.С. Горшков, А.В. Глумов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – №1. – С.28–33.
8. Королева, Т.И. Исследование возможности конденсации водяного пара в толще многослойной конструкции наружного ограждения / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №2. – С.152–158.
9. Куприянов, В.Н. Влияние конструкции ограждения на конденсацию парообразной влаги / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, М.Р. Шамсутдинов // Жилищное строительство. – 2012. – №6. – С.29–31.
10. Куприянов, В.Н. Основные принципы конструирования наружных стен с ограничением конденсации в них парообразной влаги / В.Н. Куприянов // Строительство и реконструкция. – 2015. – №2(58). – С.120–126.
11. Фролов, М.В. Оценка влажностного режима в стенах из газобетона в зависимости от характеристик наружного отделочного покрытия / М.В. Фролов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1. – С.90–97.

### References

1. Sokov, V.N. Facade non-combustible paint based on potassium liquid glass: compositional features / V.N. Sokov, S.I. Bazhenova, M.A. Petrov, A.Yu. Pepelyaeva // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2019. – №1. – P.33–38.
2. Busolo, F. Facade paints with inorganic colorants / F. Busolo // Paints and varnishes and their application. – 2016. – №7–8. – P.18–21.
3. Ivaschenko, Yu.G. Analysis of styrene-acrylic dispersions as binders for building paints / Yu.G. Ivaschenko, N.N. Fomina, A.R. Ismagilov // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2018. – №1. – P.6–11.
4. Loganina, V.I. Assessment of the effect of finishing coatings on the change in the moisture regime of aerated concrete enclosing structures / V.I. Loganina, M.V. Frolov, Yu.P. Skachkov // Vestnik MGSU. – 2018. – Vol. 13, №11. – P.1349–1356.
5. Kornienko, S.V. Evaluation humidity conditions multilayer wall structure in the annual cycle / S.V. Kornienko, N.I. Vatin, M.R. Petrychenko, A.S. Gorshkov // Construction of unique buildings and structures. – 2015. – №6. – P. 19–33.
6. Loganina, V.I. Influence of heat-insulating plaster based on lime-perlite composition on the moisture regime of the outer walls of buildings / V.I. Loganina, M.V. Frolov, A.D. Ryzhov // Regional architecture and engineering. – 2016. – №1. – P. 44–47.
7. Vatin, V.I. Effect of physical, technical and geometrical characteristics of plasters on the walls of homogeneous humidity conditions of concrete blocks / V.I. Vatin, A.S. Gorshkov, A.V. Glumov // Civil Engineering Journal. – 2011. – №1. – P. 28–33.
8. Koroleva, T.I. Investigation of the possibility of condensation of water vapor in the thickness of the multilayer structure of the external fence / T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva // Regional architecture and engineering. – 2018. – №2. – P. 152–158.
9. Kupriyanov, V.N. The influence of the design of the fence on the condensation of vaporous moisture / V.N. Kupriyanov, I.Sh. Safin, M.R. Shamsutdinov // Housing. – 2012. – №6. – P. 29–31.
10. Kupriyanov, V.N. The basic principles of the design of external walls with limited condensation of vaporous moisture in them / V.N. Kupriyanov // Construction and reconstruction. – 2015. – №2(58). – P. 120–126.
11. Frolov, M.V. Assessment of the humidity regime in the walls made of aerated concrete, depending on the characteristics of the external finishing coating / M.V. Frolov // Regional architecture and engineering. – 2020. – №1. – P.90–97.

УДК 69:519.7

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

**Будылина Евгения Александровна**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Инфокогнитивные  
технологии»  
E-mail: bud-ea@yandex.ru

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

**Гарькина Ирина Александровна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

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

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

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

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

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

**Danilov Aleksander 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

## ОСНОВЫ КАЧЕСТВЕННОЙ И КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

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

Производится практическая реализация принципов оценки управления качеством сложных систем модульной структуры различной природы, исходя из условий гарантированности результатов, их подтверждаемости и управляемости. Даны приложения методов планирования эксперимента, регрессионного и дисперсионного анализа к прогнозированию свойств композиционных материалов. Подход иллюстрируется на примере исследования свойств эпоксидных композитов. Разработан системологический подход к разработке материалов; методологические принципы синтеза определяются представлением материалов как систем с соответствующими системными атрибутами. Алгоритм синтеза позволяет оптимизировать их структуру и свойства на каждом уровне иерархии, в том числе при противоречивых критериях качества.

*Ключевые слова: сложные системы, композиты, моделирование, оценка качества, критерии, управление, прогнозирование свойств, планирование эксперимента*

## FUNDAMENTALS OF QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS OF HIERARCHICAL STRUCTURE

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

Practical implementation of the principles of assessing the quality management of complex systems of modular structure of various nature is carried out, based on the conditions of guaranteed

results, their confirmability and controllability. Application of methods for planning an experiment, regression and analysis of variance to predicting the properties of composite materials is given. The approach is illustrated by the example of studying the properties of epoxy composites. A systematic approach to the development of materials has been developed; methodological principles of synthesis are determined by representing materials as systems with appropriate system attributes. The synthesis algorithm allows to optimize their structure and properties at each level of the hierarchy, including conflicting quality criteria.

*Key words: complex systems, composites, modeling, quality assessment, criteria, control, property prediction, experiment planning*

## 1. Введение

*Качество системы (объективная характеристика!) определяется как совокупность свойств системы и их синергизм (оценивается по отношению к качествам других аналогичных однородных систем или эталонной системы). В основе такого сравнения лежит моделирование системы с пошаговой корректировкой исходной модели (гомеостатическая концепция моделирования). Нулевое приближение – каркас модели; первое – модельный эксперимент; второе приближение – результат корректировки первого и т.д. Качественная оценка модели позволяет характеризовать ее лишь с точки зрения ее понятности, простоты использования, тестируемости, возможности развития, а также применения в других проблемных областях (на ранних стадиях когнитивного моделирования слабоструктурированных систем). Эффективность и надежность модели всегда оцениваются количественными критериями. Промежуточное положение между количественными и качественными критериями занимают критерии с балльными шкалами. Утверждение о значениях критериев с заданными типами шкал считается адекватным, если его истинность сохраняется после любых допустимых преобразований, определяемых типами шкал. Так что при анализе и решении многокритериальной задачи оптимизации необходимо применять только те определения и понятия, методы и процедуры, которые приводят к получению адекватных выводов и рекомендаций. Очевидна необходимость минимизации размерности пространства критериев.*

При получении многофакторной математической модели выбираются лишь статистически значимые (определяются на основании отсеивающего эксперимента). Определяющим для получения качественных моделей является описание различных взаимодействий факторов, создающих системный эффект влияния факторов на моделируемый критерий качества.

Представления о формировании структуры и свойств системы всегда приближенные, поэтому невозможно точно рассчитать и реализовать гарантированное качество в рамках какой-либо теории (всегда в описании системы что-то будет оставаться неучтенным; нельзя получить абсолютно точные результаты измерений и т.д.). Для обеспечения гарантированного качества необходимо, чтобы значения показателей лежали в обоснованных допустимых пределах. Полученный уровень гарантированности требуемого качества одновременно даст возможность и оценки риска невыполнения заданных требований (на объективном количественном уровне). Проблема подтверждаемости связана с экспериментальной проверкой модельных показателей качества. Что касается проблемы управляемости, то основными являются: формирование иерархической системы целей, многокритериальность, объективный анализ эффективности системы, выбор наиболее рационального варианта, определение глобального критерия качества (отражает совокупность свойств системы). Указанные проблемы в той или иной мере решаются с применением вероятностных методов (корреляционный анализ, экспертные оценки, ранговая корреляция и т.д.).

Управление качеством системы направлено на обеспечение и поддержание необходимого уровня качества, а контроль качества состоит в оценке соответствия системы требованиям (наблюдение, измерение, испытания). Качество системы определяется ее свойствами. Численное выражение каждого из контролируемых параметров является

ся результатом измерения и *количественного оценивания* (измеряемые величины могут быть как размерными, так и безразмерными).

Таким образом, для оценки качества необходимо:

– указать перечень *тех* свойств, совокупностью которых в достаточно полной мере *характеризуется качество*;

– измерить свойства (численные значения);

– аналитически сопоставить полученные данные с подобными характеристиками другой системы, принимаемой за образец или эталон качества (*квалиметрическая оценка качества системы не может быть получена без базовых значений показателей качества эталона*). Выбор эталона качества, с данными которого сопоставляются свойства исследуемой системы, *субъективен*, равно как и *итоговая характеристика уровня качества системы* (по соответствию потребностям); *никакой выбранный эталон качества не может удовлетворить всех*.

*Нижний иерархический уровень* показателей определяется *единичными показателями простейших свойств*, формирующих качество. Показателем качества *высшего иерархического уровня* является *интегральный показатель*. Показатель любого обобщения, кроме самого нижнего (исходного) уровня, предопределяется соответствующими показателями предшествующего иерархического уровня. *При комплексной оценке качества все разноразмерные показатели свойств должны быть преобразованы и приведены к одной размерности или выражены в безразмерных единицах измерения*. В комплексном показателе качества каждый показатель отдельного свойства должен быть скорректирован *коэффициентом его весомости* (сумма численных значений коэффициентов весомостей всех показателей качества на любых иерархических ступенях оценки имеет одинаковое значение). *Недопустимо использование взаимообусловленных, дублирующих показателей одного и того же свойства*. Часто возможно использование глобального критерия в виде линейной свертки

$$q(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^m c_j q_j(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

весовые константы отражают представление оперирующей стороны о содержании принимаемого компромисса (*ранжирование целей*). От некоторых недостатков такого критерия можно избавиться при нормировке частных критериев, в частности при  $n = 2$  можно принять

$$q(x_1, x_2) = c_1 \frac{q_1(x_1, x_2) - \bar{q}_1}{S_{q_1}} + c_2 \frac{q_2(x_1, x_2) - \bar{q}_2}{S_{q_2}},$$

$$\bar{q}_1 = \frac{1}{S} \iint_S q_1(x_1, x_2) dx_1 dx_2, \quad \bar{q}_2 = \frac{1}{S} \iint_S q_2(x_1, x_2) dx_1 dx_2;$$

$$S_{q_1} = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S (q_1 - \bar{q}_1)^2 dx_1 dx_2}, \quad S_{q_2} = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S (q_2 - \bar{q}_2)^2 dx_1 dx_2}.$$

Превентивное или корректирующее воздействия на объект с целью изменения качества осуществляются по результатам оптимизации показателей свойств и качества в целом. Указанными методологическими принципами все концептуальные положения оценки качества не исчерпываются, но они являются основополагающими. О положительных результатах практической реализации приведенных принципов при управлении качеством сложных систем с модульной структурой можно судить по [1...4].

## 2. Прогнозирование свойств композитов

Приведем приложения методов планирования эксперимента, регрессионного и дисперсионного анализа к прогнозированию свойств композиционных материалов. Подход иллюстрируется на примере исследования свойств эпоксидных композитов; наибольшее распространение для описания функции отклика и прогнозирования свойств материалов получили нижеприведенные модели [5...7].

*Регрессионная модель.* Используется для определения зависимости отклика от **количественных** факторов (температура, давление, вес и т.п.)  $\mathbf{x}$  и ошибок  $\varepsilon$  наблюдения отклика:

$$y = \eta + \varepsilon = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) + \varepsilon.$$

При равноточности и некоррелированности наблюдений  $E[\varepsilon_u^2] = \sigma^2$ ,  $E[\varepsilon_u] = 0$ ,  $E[\varepsilon_u \varepsilon_v] = 0$ ,  $u \neq v$  справедливо:

$$y_u = \eta_u + \varepsilon_u = f(\mathbf{x}_u, \boldsymbol{\theta}) + \varepsilon_u.$$

Регрессионный анализ является статистическим методом анализа и обработки экспериментальных данных при воздействии на отклик только количественных факторов и фактически представляет собой сочетание аппарата метода наименьших квадратов и техники статистической проверки гипотез. Если функция отклика  $f$  есть линейная комбинация базисных функций от факторов (модель регрессионного анализа), то

$$y = \eta + \varepsilon = \beta_1 f_1(x_1, x_2, \dots, x_k) + \beta_2 f_2(x_1, x_2, \dots, x_k) + \dots + \beta_m f_m(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon$$

или

$$y = \mathbf{f}^T(\mathbf{x})\boldsymbol{\beta} + \varepsilon.$$

Здесь  $\beta_i$  – параметры модели (коэффициенты регрессии)  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$  – известные базисные функции переменных  $x_1, x_2, \dots, x_k$  (факторов), не зависящие от параметров модели;  $\mathbf{f}^T(\mathbf{x}) = \|f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})\|$  – вектор-строка базисных функций (базисная вектор-функция);  $\boldsymbol{\beta}^T = \|\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\|$  – вектор параметров модели. На практике чаще всего используются *полиномиальные модели*:

– модель регрессионного анализа первого порядка:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

(если ввести фиктивную переменную  $x_0 \equiv 1$ , то модель можно представить в виде

$$y = \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon);$$

– квадратичная модель (в общем случае содержит  $\frac{(k+1)(k+2)}{2}$  параметров):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \beta_{k-1,k} x_{k-1} x_k + \beta_{11} x_1^2 + \dots + \beta_{k,k} x_k^2 + \varepsilon.$$

*Модель дисперсионного анализа.* Здесь изучается зависимость отклика от **качественных** факторов (вид материала, сорт цемента и т.д.) и ошибок наблюдений отклика:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots + \beta_k x_k + \varepsilon,$$

$x_i$  – дискретные переменные, обычно целочисленные (часто 0 либо 1).

Если количественный фактор принимает в эксперименте небольшое число различных значений, то его можно рассматривать как качественный.

*Метод ковариационного анализа.* Является сочетанием элементов регрессионного и дисперсионного анализа; учитываются воздействия на отклик как количественных, так и качественных факторов.

Обычно соответствие математической модели экспериментальным данным при выбранном критерии (адекватность математической модели) проверяется по известному  $F$ -критерию Фишера. Возможности практического использования полученных моделей существенно определяются:

– априорным ранжированием факторов;



- выбором размахов (разности между максимальным и минимальным натуральными значениями факторов), определяющих границы области варьирования факторов;
- выбором интервалов варьирования факторов в факторном пространстве (половина размаха варьирования фактора  $\Delta x_i^H$ ; задает область  $(x_{i0}^H + \Delta x_i^H; x_{i0}^H - \Delta x_i^H)$  действия для данного плана);
- удачным выбором функции отклика (зависимость математического ожидания отклика от факторов  $E[y / \mathbf{x}] = \eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ ; параметры модели  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$  априори неизвестны и подлежат определению из эксперимента).

В полиномиальном уравнении регрессии эффекты взаимодействия факторов (зависимости изменения эффекта одного фактора от уровней других факторов) определяются параметрами при членах, включающих произведения факторов (парные взаимодействия –  $x_i x_j$ , тройные –  $x_i x_j x_k$  и т.д.).

Приведенный подход в частности использовался для прогнозирования свойств эпоксидных композитов на аппретированном наполнителе на основе отходов производства оптического стекла (ОПОС) и технического углерода (ТУ) [8]. Предварительное ранжирование факторов, выбор размахов и интервалов их изменения, эффективный выбор функции отклика осуществлялись на основе когнитивного моделирования, а также с учетом данных экспертных оценок. В качестве функций отклика последовательно рассматривались предел прочности (МПа) при сжатии эпоксидного связующего (ЭС) на основе отходов производства оптического стекла и технического углерода соответственно. Были получены модели:

$$R_{сж}^{ОПОС} = 163 + 32,9x_1 - 16,7x_2 - 1,17x_1^2 - 6,17x_2^2 + 8,88x_1^2x_2 - 0,86x_1x_2^2 - 12x_1^3 - 7,87x_2^3;$$

$$R_{сж}^{ТУ} = 141 + 29x_1 - 20,1x_2 - 0,5x_1^2 - 7x_2^2 + 10,7x_1^2x_2 - 2,68x_1x_2^2 - 11,3x_1^3 + 9,46x_2^3,$$

где  $x_1, x_2$  – кодированные значения объемной степени наполнения и расчётной толщины слоя аппрета (ЭС на основе ОПОС или ТУ соответственно).

Для всех исследованных составов экстремальные значения предела прочности при сжатии достигаются при промежуточных значениях варьируемых факторов; областью наиболее интенсивных структурных трансформаций в ЭС на основе ОПОС определяется неравенствами

$$0,1 < v_f < 0,2, \quad 0,4 < v_f < 0,6.$$

Биекстремальный характер полученных зависимостей отражает структурные трансформации в эпоксидном связующем. Для связующего на основе ТУ характерны несколько меньшие по сравнению с составами, наполненными ОПОС, значения предела прочности при сжатии. Управление прочностью ЭС на основе тонкодисперсного ОПОС целесообразно аппретированием наполнителя (позволяет повысить прочность на 7...12 %). При малой дисперсности наполнителя аппретирование поверхности устраняет недостаток наполнителя.

### 3. Системологический подход к разработке материалов

Здесь методологические принципы синтеза строительных материалов определяются их представлением как систем с соответствующими системными атрибутами. На основе когнитивного моделирования [9] материалов разрабатывается иерархическая структура композитов. Алгоритм синтеза позволяет оптимизировать их структуру и свойства на каждом уровне иерархии, в том числе при противоречивых критериях качества. Целостный системологический подход основан на междисциплинарных исследованиях и интеграции различных знаний (для изучения отдельных аспектов) и позволяет комплексно и всесторонне изучить проблему, выделить приоритеты и оптимизировать основные параметры системы [10...14].

В соответствии с *парадоксом иерархичности* описание системы возможно только при наличии ее описания как элемента надсистемы, и обратно, описание системы как элемента надсистемы возможно только при наличии описания данной системы. Каж-

дая система входит в некоторую надсистему. Подсистемы есть системы для своих подсистем. Возможны способы выделения систем на основе *расчленения объектов* на множество составных элементов (систем различной природы) и выявления между ними системообразующих межэлементных связей и отношений, придающих целостность, а также путем представления отдельных сторон, являющихся существенными для исследуемой проблемы (смачиваемость, капиллярные процессы и др.), а не всего исследуемого объекта. Целостную систему нельзя разложить на отдельные компоненты без потери интегративных свойств, если изменение любого элемента системы ведет к изменению всей системы. Отметим, что плохо организованные объекты, *не обладающие интегративными качествами*, являются *псевдосистемами* (не являются системами: свойство или потенциал объекта не больше, чем сумма свойств или потенциалов составных элементов).

*Высший уровень иерархии* – национальные интересы страны: территориальная целостность страны; независимость и свобода; благополучие ее граждан; обеспечение высокого качества жизни\*; защита жизни, собственности\* и конституционных прав. На втором уровне иерархии находятся целостные подсистемы: экономическая\*, политическая, социальная\*, духовная, международных отношений, экологии\* и др. В числе приоритетных – подсистемы: экономическое благополучие\*; подъем и укрепление отечественного производства (конкурентоспособных высокотехнологичных отраслей); национальная безопасность (военная, экономическая\*, экологическая\*, информационная и др.). Естественно, качество строительных материалов должно оцениваться как качество элемента целостной системы с учетом места в иерархической структуре надсистемы (для системы «строительные материалы» выше они отмечены знаком\*). При этом критерий качества подсистемы должен быть частью общего критерия качества системы, определяемого ее интегративными свойствами (организмический принцип).

*В основе предлагаемых методологических принципов синтеза строительных материалов лежит представление их как систем с соответствующими системными атрибутами. Рассматривая строительный материал как целостную систему, при анализе ее частей можно воспользоваться известными методами, позволяющими их агрегирование в систему.* В соответствии с *парадоксом целостности* познание системы как целостности невозможно без анализа ее частей. Подходы системного анализа и его развития (синергетический, информационный подходы), а также гомеостатический подход легко распространяются на изучение задач строительного материаловедения

Системный (общий) гомеостаз обеспечивает сохранение интегративного качества строительного материала, а частный – конкретной компоненты. Интегративное качество системы сохраняется, пока значение системообразующего параметра не выходит за пределы некоторой области; выход за пределы области частичного гомеостаза ведет к переходу системы в новое качественное состояние без разрушения системы. При приближении интегративных параметров системы к предельно допустимым возникает *системный кризис* (система вступает в зону бифуркации).

При синтезе строительных материалов основное внимание уделяется структурным исследованиям (строение, фазовый состав, связи, топология и др.) и функциональным (динамические характеристики, стойкость в эксплуатационной среде, экономическая эффективность и др.). На начальном этапе рассматриваемые материалы определяются как слабоструктурированные системы, обладающие множеством плохо формализуемых противоречивых целей и критериев. Их изучение основывается на когнитивном моделировании. Когнитивная карта позволяет формализовать взаимодействие существующих в системе основных связей в процессе функционирования. При формализации первичных представлений субъектно-формальными методами не гарантируется достоверность полученных решений. Одним из существенных факторов риска является неадекватное применение формализованной модели к конкретной проблемной ситуации (*недопонимание математического смысла конструкций специалистами проблемной области*). Здесь используются факторы, представленные в нормальной форме (переменная, принимающая значения на определенной измерительной или

оценочной шкале). Предполагаемая обычно справедливость принципа транзитивности (из  $A$  – причина  $B$ , а  $B$  – причина  $C$  следует, что  $A$  является причиной  $C$ ) во многих случаях оказалась неверной (проявлялась *ложная транзитивность*). *Построение иерархической структуры критериев качества, а на ее основе – иерархической структуры собственно системы (если это возможно) позволяет рассматривать систему как структурированную. Целевое состояние* считалось достигнутым, если оценка целенаправленного развития системы (по параметрам кинетических процессов формирования основных физико-механических характеристик), заданная в виде *функционала достижения целей*, практически не изменялась. В частности, при разработке радиационно-защитных композитов (использовались приведенные методологические принципы многокритериального синтеза; основные критерии: прочность, плотность, пористость) альтернативные компоненты материала и масштабные уровни определялись на основе когнитивной карты.

#### 4. Выводы

Разработаны основы как качественной, так и количественной оценки качества сложных систем с иерархической структурой. Указываются примеры практической реализации принципов оценки управления качеством сложных систем модульной структуры различной природы, исходя из условий гарантированности результатов, их подтверждаемости и управляемости.

Даны приложения методов регрессионного и дисперсионного анализа, планирования эксперимента к прогнозированию свойств композиционных материалов с иллюстрацией на примере исследования свойств эпоксидных композитов.

Предложен системологический подход к разработке материалов; методологические принципы синтеза определяются представлением материалов как систем с соответствующими системными атрибутами.

Алгоритм синтеза позволяет оптимизировать их структуру и свойства на каждом уровне иерархии, в том числе и при противоречивых критериях.

#### Список литературы

1. Коротких, Д.Н. Критериальная оценка конструкционного потенциала и технико-экономической эффективности современных цементных бетонов / Д.Н. Коротких, Е.М. Чернышов // Технологии бетонов. – 2019. – № 5–6 (154–155). – С. 46–49.
2. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
3. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 1 (625). – С. 80–85.
4. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.
5. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.
6. Гусев, Б.В. Особенности структурообразования гипсового вяжущего, модифицированного гидросиликатами цинка / Б.В. Гусев, А.Н. Гришина, Е.В. Королев // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 2. – С. 40–46.
7. Селяев, В.П. Аналитическое описание диаграмм деформирования бетонов при сжатии / В.П. Селяев, П.В. Селяев, А.О. Горенков, Е.С. Безрукова // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3 (44). – С. 22–30.

8. Данилов, А.М. Радиационно-защитные композиты на эпоксидном вяжущем: модификация, моделирование, оптимизация структуры и свойств / А.М. Данилов, А.Н. Круглова, В.П. Селяев, В.В. Цыганов. – Саранск: Изд-во Мордов.ун-та, 2013. – 214 с.
9. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009 – № 3–4 (603-604). – С. 30–37.
10. Королев, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.
11. Низина, Т.А. Количественный анализ кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов при растяжении / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Н.С. Канаева // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2 (88). – С. 77–89.
12. Селяев, В.П. Оценка прочности элементов конструкций из цементных композитов, подверженных действию агрессивной среды / В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.В. Сорокин, Е.Л. Кечуткина // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 1. – С. 58–64.
13. Будылина, Е.А. Из опыта системного проектирования композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2 (43). – С. 16–23.
14. Черкасов, В.Д. Структурообразование цементных композитов с добавкой модифицированного диатомита / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, О.В. Тараканов, А.И. Емельянов // Строительные материалы. – 2015. – № 11. – С. 75–77.

#### References

1. Korotkikh, D.N. Criteria assessment of the structural potential and technical and economic efficiency of modern cement concretes / D.N. Korotkikh, E.M. // Chernyshov Concrete technology. – 2019. – №. 5–6 (154–155). – P. 46–49.
2. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
3. Danilov, A.M. Methodology for the design of complex systems in the development of special-purpose materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Bulletin of higher educational institutions. Construction. – 2011. – №1 (625). – P. 80–85.
4. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Bulletin of higher educational institutions. Construction. – 2013. – №8 (656). – P. 28–33.
5. Garkina, I.A. Evolution of ideas about composite materials from the standpoint of a paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2018. – №1–2. – P. 60–62.
6. Gusev, B.V. Features of structure formation of gypsum binder modified with zinc hydrosilicates / B.V. Gusev, A.N. Grishina, E.V. Korolev // Industrial and civil construction. – 2020. – №2. – P. 40–46.
7. Selyaev, V.P. Analytical description of the diagrams of concrete deformation in compression / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, A.O. Gorenkov, E.S. Bezrukova // Regional architecture and engineering. – 2020. – №3 (44). – P. 22–30.
8. Danilov, A.M. Radiation-protective composites based on epoxy binder: modification, modeling, optimization of structure and properties / A.M. Danilov, A.N. Kruglova, V.P. Selyaev, V.V. Tsyganov. – Saransk: Publishing house of Mordovian University. – 2013. – 214 p.

9. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Bulletin of higher educational institutions. Construction. – 2009. – №3–4 (603–604). – P. 30–37.
10. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Building materials. – 2020. – № 9. – P. 54–61.
11. Nizina, T.A. Quantitative analysis of the kinetics of damage accumulation in the structure of polymer materials under tension / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, N.S. Kanaeva // Construction and reconstruction. – 2020. – №2 (88). – P. 77–89.
12. Selyaev, V.P. Evaluation of the strength of structural elements made of cement composites exposed to an aggressive environment / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.V. Sorokin, E.L. Kechutkina // Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies. – 2018. – №1. – P. 58–64.
13. Budylna, E.A. From the experience of system design of composite materials / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2020. – №2 (43). – P. 16–23.
14. Cherkasov, V.D. Structural formation of cement composites with the addition of modified diatomite / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, O.V. Tarakanov, A.I. Emelyanov // Building materials. – 2015. – №11. – P. 75–77.

УДК 691.4:691.554

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

Россия, 430005, г. Саранск,  
ул. Большевикская, д.68,  
тел./факс: (8342) 47-71-56

**Низина Татьяна Анатольевна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»,  
советник РААСН  
E-mail: nizinata@yandex.ru

**Володин Владимир Владимирович**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

**Балыков Артемий Сергеевич**,  
кандидат технических наук, инженер  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: artbalrun@yandex.ru

**Коровкин Дмитрий Игоревич**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: asfkorovkin@yandex.ru

*National Research Ogarev Mordovia State  
University*

Russia, 430005, Saransk,  
68, Bolshevistskaya St.,  
tel./fax: +7(8342)47-71-56

**Nizina Tatyana Anatolevna**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Building structures»,  
Adviser of the Russian Academy Of  
Architecture and Construction Sciences  
E-mail: nizinata@yandex.ru

**Volodin Vladimir Vladimirovich**,  
Postgraduate student of the department  
«Building structures»  
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

**Balykov Artemy Sergeevich**,  
Candidate of Sciences, Engineer of the  
department «Building structures»  
E-mail: artbalrun@yandex.ru

**Korovkin Dmitriy Igorevich**,  
Postgraduate student of the department  
«Building structures»  
E-mail: asfkorovkin@yandex.ru

## ОЦЕНКА КИНЕТИКИ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ДОБАВКАМИ ТЕРМОАКТИВИРОВАННОЙ ГЛИНЫ И КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Т.А. Низина, В.В. Володин, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин

Представлены результаты исследования влияния термоактивированной глины, карбонатных пород и их термоактивированных смесей на характер изменения прочности цементного камня во временном диапазоне от 1 суток до 1 года. Определены оптимальные дозировки исследуемых добавок, позволяющие повысить прочностные показатели цементных композитов. С использованием метода порошковой рентгеновской дифракции подтверждена пуццолановая активность модификаторов на основе прокаленной полиминеральной глины, характеризующаяся повышением степени гидратации портландцемента и снижением концентрации гидроксида кальция в цементных системах. Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной рецептурной эффективности исследуемых минеральных добавок в составах цементных бетонов.

*Ключевые слова: цементный камень, полиминеральная глина, доломит, известняк, термическая активация, прочность, фазовый состав*

## EVALUATION OF KINETICS OF HARDENING OF CEMENT STONE MODIFIED WITH ADDITIVES OF THERMALLY ACTIVATED CLAY AND CARBONATE ROCKS

T.A. Nizina, V.V. Volodin, A.S. Balykov, D.I. Korovkin

The results of the research of the influence of thermally activated clay, carbonate rocks and their thermally activated mixtures on the nature of changes in the strength of cement stone in the time range from 1 day to 1 year are presented. The optimal dosages of the researched additives, which allow to increase the strength indicators of cement composites, are determined. Using the method of powder

x-ray diffraction pozzolanic activity of modifiers based on calcined polymineral clay, characterized by an increase in the degree of hydration of portland cement and a decrease in the concentration of calcium hydroxide in cement systems, is confirmed. The obtained results indicate the potential prescription effectiveness of the researched mineral additives in the compositions of cement concretes.

*Keywords: cement stone, polymineral clay, dolomite, limestone, thermal activation, strength, phase composition*

Долгосрочный набор прочности, обусловленный растянутыми во времени процессами гидратации клинкерных минералов, – важнейший показатель цементного бетона, выгодно выделяющий его среди других видов строительных материалов. По сравнению с конструкциями из металла, дерева и пластмасс несущая способность железобетонных конструкций при благоприятных условиях эксплуатации имеет тенденцию к повышению в течение длительного времени – 1-3 года, а в ряде случаев и более [1].

В настоящее время большое внимание уделяется разработке модифицированных бетонов с высокими эксплуатационными свойствами, отличающихся сложным многокомпонентным составом с широким применением различного рода модификаторов, позволяющих эффективно управлять структурообразованием и свойствами материала. При этом для повышения прочностных характеристик цементных систем наиболее эффективным является совместное использование активных минеральных добавок и суперпластификаторов, которое нивелирует высокую водопотребность порошкообразного минерального компонента, снижает значение В/Ц без ущерба для реологических свойств смесей и темпа нарастания ранней прочности бетонов [2–6].

В России в последние годы существенно расширилась номенклатура минеральных добавок, используемых для улучшения технологических и эксплуатационных показателей цементных бетонов. В частности, значительно возрос интерес к метакаолину, являющемуся эффективной пуццолановой добавкой алюмосиликатного состава. Во многом это связано с активной разработкой месторождений мономинеральных каолиновых глин, в том числе и на территории Российской Федерации [7]. Тем не менее дальнейшее наращивание объёмов производства метакаолина в нашей стране представляется затруднительным в силу ограниченности месторождений и запасов каолина, объём которых не превышает 3 % от общемировых [8].

Относительная дефицитность каолина и высокая стоимость метакаолина способствовали возрастанию интереса исследователей к запасам широко распространённых полиминеральных глин с целью создания на их основе пуццолановых добавок для различных минеральных вяжущих [9–15]. При этом в настоящее время помимо получения эффективных глинитов важное значение придается разработке комплексных минеральных добавок, в рецептуре которых наряду с глинистым компонентом используются горные породы другого химико-минералогического состава. В частности, результаты ряда исследований [16, 17] свидетельствуют о повышении эффективности в цементных системах каолиновых и полиминеральных глин при их совместной термоактивации с карбонатными породами.

На основе ранее проведенных исследований [15, 18] авторским коллективом экспериментально подтверждено, что применение добавок, полученных совместным обжигом полиминеральных глин и карбонатных пород, способствует ускорению процессов схватывания пластифицированного цементного теста на ранних стадиях твердения цементных систем. С целью установления потенциала к повышению прочностных показателей модифицированного цементного камня при продолжающихся процессах гидратации вяжущих были проведены исследования по оценке их кинетики твердения до достижения цементным камнем возраста 1 год.

Основным компонентом вяжущего в исследуемых составах являлся портландцемент 500-Д0-Н производства ПАО «Мордовцемент». В качестве модификаторов цементных систем использовались поликарбоксилатный суперпластификатор Melflux 5581 F (в количестве 1 % от массы вяжущего) и три вида минеральных добавок: глина Никитского месторождения, обожжённая при 700°C в течение 2 часов (ТГН); доломит Ельниковского месторождения (ДЕ); смесь никитской глины и известняка Атемар-

ского месторождения (соотношение глины и известняка = 2:1), обожжённая при 700°C в течение 2 часов (ТС(ГН+ИА)). Месторождения исследуемых пород находятся на территории Республики Мордовия. Добавки подвергались помолу в шаровой мельнице в течение 1 часа. Получаемые порошки вводились в состав цементного вяжущего в количестве от 5 до 20 % от его массы. Водотвёрдое отношение составляло 0,21.

По результатам качественного и количественного рентгенофазового анализа установлено (табл. 1), что фазовый состав глины Никитского месторождения представлен преимущественно минералами каолиновой и иллитовой (гидрослюдь) групп, модификациями кварца и полевыми шпатами, т.е. данную глину можно отнести к полиминеральным. Минералогический состав известняка Атемарского месторождения представлен преимущественно кальцитом (96 мас. %) с включениями кварца (4 мас. %), а доломита Ельниковского месторождения – доломитом (52 мас. %) и кальцитом (48 мас. %).

Т а б л и ц а 1  
Количественный фазовый состав исследуемых минеральных добавок в исходном состоянии (до термической обработки)

Порода	Содержание кристаллических фаз, %						
	Модификации каолинита	Иллитовая группа (гидрослюдь)	Модификации кварца	Полевые шпаты	Гипс	Кальцит	Доломит
Глина	39,8	23,1	19,8	14,2	3,1	–	–
Доломит	–	–	–	–	–	48	52
Известняк	–	–	4	–	–	96	–

С применением РФА проведены исследования влияния ТГН, ДЕ и ТС(ГН+ИА) на процессы гидратации портландцемента и фазовый состав цементного камня в возрасте 28 суток. Установлено, что введение в цементные системы исследуемых минеральных добавок в количестве 20 % от массы вяжущего (Ц+МД) приводит к повышению степени гидратации портландцемента на 12÷17 % по сравнению с аналогичным показателем контрольного состава (табл. 2). Полученные данные свидетельствуют об интенсификации процессов гидратации портландцемента в присутствии минеральных добавок ТГН, ДЕ и ТС(ГН+ИА), что может быть обусловлено как наличием реакционноспособных минералов каолинита и иллита в фазовом составе никитской глины (см. табл. 1), так и способностью минералов ельниковского доломита выступать в качестве центров кристаллизации новообразований.

Т а б л и ц а 2  
Результаты РФА цементного камня в возрасте 28 суток

Состав вяжущего (Ц+МД)	Степень гидратации портландцемента, %	Относительное содержание портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$
100 % Ц	65	100
80 % Ц + 20 % ТГН	79	73
80 % Ц + 20 % ДЕ	82	91
80 % Ц + 20 % ТС(ГН+ИА)	77	75

В то же время введение в рецептуру цементных систем термоактивированной никитской глины и термоактивированной смеси никитской глины и атемарского известняка способствует снижению на 25÷27 % содержания портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  относительно показателя бездобавочного состава (см. табл. 2). Данный химический эффект свидетельствует о наличии пуццоланической активности ТГН и ТС(ГН+ИА) в цемент-



ных системах и, как было отмечено ранее, может быть обусловлен присутствием в составе обожженной никитской глины алюмосиликатных минералов с частично разрушенной при дегидратации кристаллической решеткой (прежде всего продуктов частичного термического разрушения каолинита и иллита).

На следующем этапе исследований была проведена оценка влияния добавок термоактивированной глины и карбонатных пород на закономерности изменения прочности цементного камня при сжатии во временном диапазоне от 1 суток до 1 года. Графические зависимости, описывающие кинетику твердения цементного камня, модифицированного тремя видами минеральных добавок, в течение 365 суток в нормальных влажностных условиях, представлены на рис. 1. Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение в цементные системы термоактивированной никитской глины в количестве 5-15 % от массы вяжущего способствует повышению на 7-10 % прочности при сжатии композитов в возрасте 1 года по сравнению с аналогичным показателем контрольного состава (рис. 1, а). Близкая к бездобавочному составу кинетика твердения зафиксирована для цементного камня, содержащего от 5 до 10 % ТС(ГН+ИА). Повышение содержания вяжущего в составе смеси никитской глины и известняка Атемарского месторождения до 15 и 20 мас. % приводит к снижению прочностных показателей при сжатии к 365 суткам твердения соответственно в 1,22 и 1,37 раза. Все составы цементного камня, содержащие доломит Ельниковского месторождения в концентрации от 5 до 20 % от массы вяжущего (Ц+ДЕ), характеризуются более низкими прочностными показателями, чем контрольный бездобавочный состав. Предел прочности при сжатии к 365 суткам твердения для данных композитов монотонно снижается с повышением доли вводимой добавки от 1,07 до 1,22 раза.

В целом, области оптимальных концентраций минеральных добавок, позволяющие получить модифицированные цементные композиты, не уступающие по прочностным показателям контрольному составу, остаются постоянными как при анализе экспериментальных данных в проектном возрасте, так и через год твердения (рис. 2). В частности, дозировка термоактивированной никитской глины не должна превышать 18 %, термоактивированной смеси никитской глины и атемарского известняка – 11 % от массы вяжущего (Ц+МД). При этом наибольший прирост прочности при сжатии через 28 суток твердения, составляющий 6 % по сравнению с контрольным составом, зафиксирован для цементных систем, содержащих 10-15 % ТГН (рис. 2, а). Наиболее выраженный эффект от введения минеральных добавок к 365 суткам, достигающий 11 %, выявлен для цементного камня, содержащего от 5 до 10 % термоактивированной никитской глины (рис. 2, б).

В табл. 3 представлены данные по увеличению предела прочности при сжатии исследуемых цементных систем во временном диапазоне от 28 до 365 суток твердения. Установлено, что на рассматриваемом интервале времени прирост прочности цементного камня контрольного состава составил 18 %. Аналогичные показатели цементных систем с добавками ТГН, ДЕ и ТС(ГН+ИА) варьируются в диапазонах 16÷26 %, 16÷20 % и 9÷18 % соответственно.

Т а б л и ц а 3

Прирост предела прочности при сжатии цементных композитов  
во временном диапазоне от 28 до 365 суток

Вид минеральной добавки	Содержание минеральной добавки, % от массы вяжущего (Ц+МД)				
	0	5	10	15	20
ТГН	18,4	26,4	24,6	20,1	15,7
ДЕ		18,3	15,7	19,8	15,5
ТС(ГН+ИА)		17,4	17,5	8,8	14,3

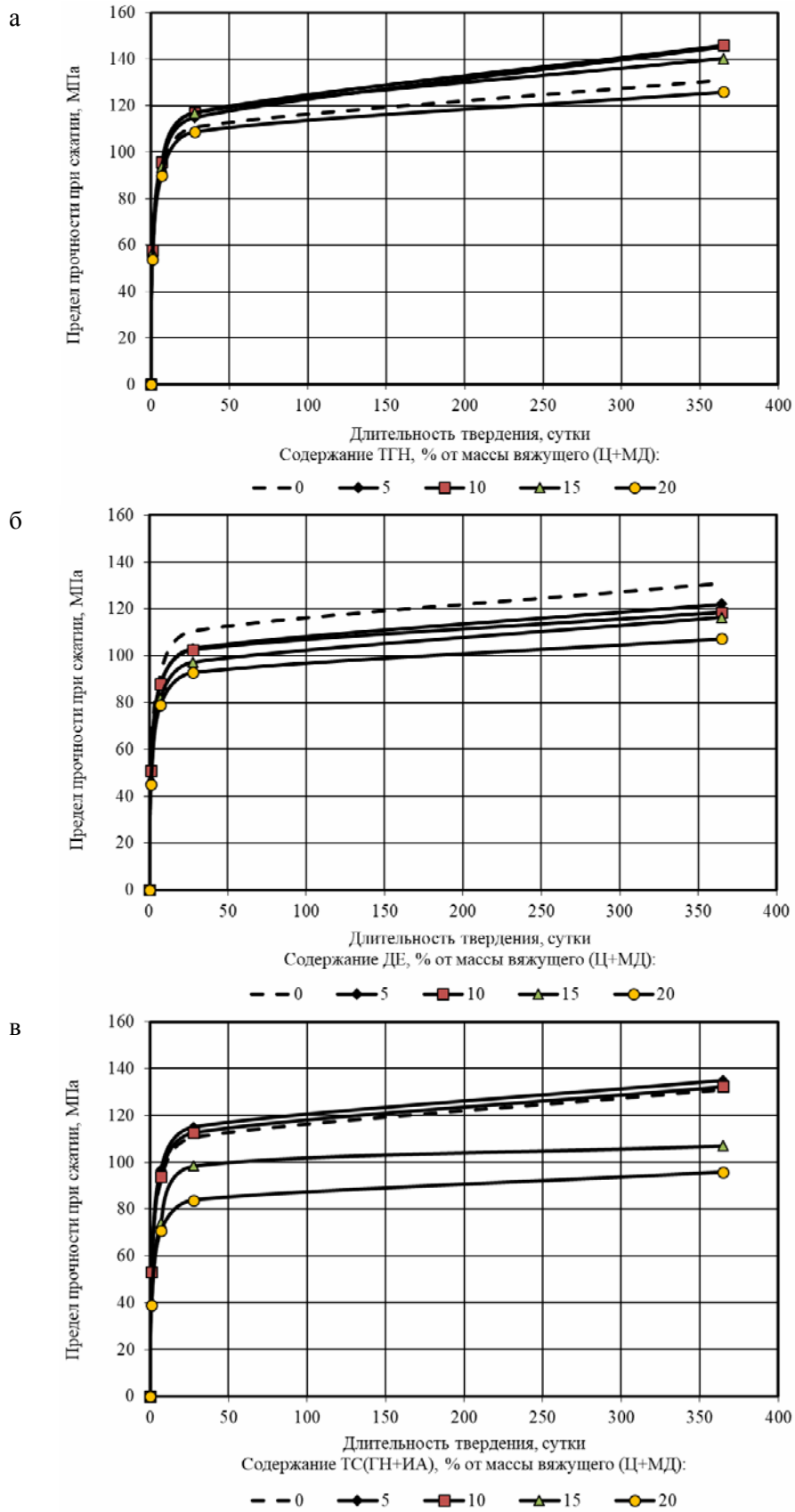


Рис 1. Кинетика твердения цементного камня с минеральными добавками:  
а – ТГН; б – ДЕ; в – ТС(ГН+ИА)

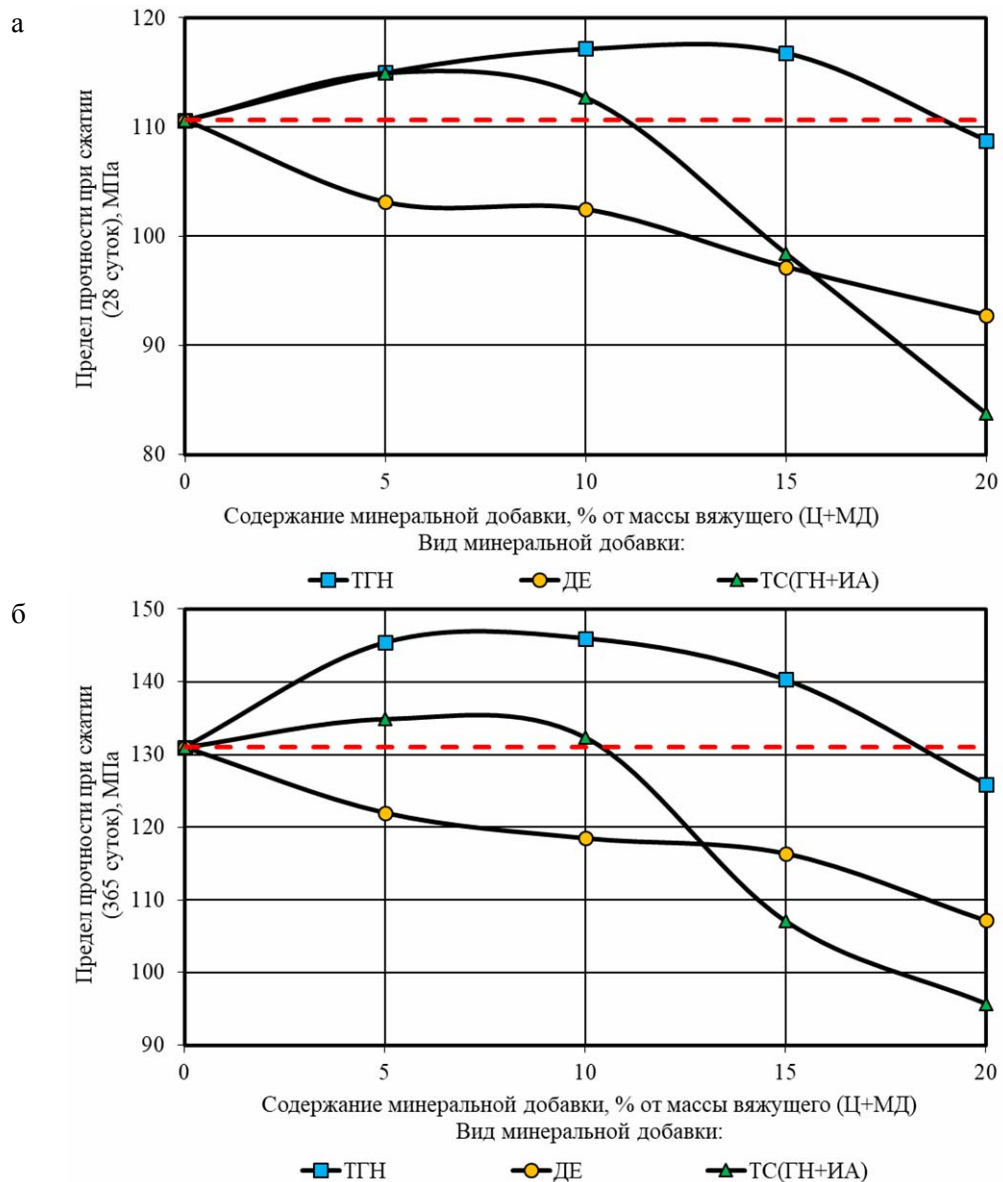


Рис. 2. Изменение предела прочности при сжатии цементного камня в возрасте 28 (а) и 365 (б) суток в зависимости от вида и содержания минеральных добавок (красной штриховой линией показан уровень прочностных показателей контрольного состава)

Обобщая результаты экспериментальных исследований, можно отметить, что ельниковский доломит является инертной минеральной добавкой, повышение его доли в составе цементных композитов до 20 % от массы вяжущего приводит к снижению прочностных показателей для всех исследованных временных интервалов (от 1 суток до 1 года). При этом применение оптимальных концентраций минеральных добавок ТГН и ТС(ТГН+ИА), подвергнутых предварительной термоактивации в течение 2 часов при температуре 700°C, позволяет повысить прочностные показатели цементного камня. Наибольший эффект наблюдается при использовании термоактивированной никитской глины в количестве 5-15 % от массы модифицированного цементного вяжущего. Результаты экспериментов подтверждают перспективность исследований в области разработки эффективных минеральных добавок для цементных бетонов, получаемых на основе термоактивированных полиминеральных глин, в том числе в присутствии карбонатных пород.

## Список литературы

1. Пятница, А.И. Особенности определения износа и оценки ресурса эксплуатируемых объектов из железобетона / А.И. Пятница, Г.В. Мурашкин // *Современные проблемы науки и образования*. – 2009. – № 6–1.
2. Калашников, В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего / В.И. Калашников // *Строительные материалы*. – 2016. – №1–2. – С. 96–103.
3. Yu, R. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses / R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers // *Cement and Concrete Composites*. – 2015. – Vol. 55. – P. 383–394.
4. Ghafari, E. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra-high performance concrete / E. Ghafari, H. Costa, E. Julio, A. Portugal // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 59. – P. 1–9.
5. Tran, N.T. Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads / N.T. Tran, D.J. Kim // *Cement and Concrete Composites*. – 2017. – Vol. 78. – P.132–145.
6. Поспелова, М.А. Регулирование кинетики твердения цементных систем химическими добавками: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Поспелова Марина Алексеевна. – Белгород, 2003. – 129 с.
7. Brykov, A.S. Hydration of portland cement in the presence of highly reactive metakaolin / A.S. Brykov, S.A. Krasnobaeva, M.V. Mokeev // *Materials Sciences and Applications*. – 2015. – Vol. 6. – P. 391.
8. Горбачев, Б.Ф. Состояние и перспективы развития в Российской Федерации сырьевой базы каолина / Б.Ф. Горбачев // *Промышленные минералы: проблемы прогноза, поисков, оценки и инновационные технологии освоения месторождений: материалы Международной научно-практической конференции*. – Казань: ЗАО Издательский дом «Казанская недвижимость», 2015. – С. 111–114.
9. Fernandez, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite / R. Fernandez, F. Martirena, K.L. Scrivener // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – Vol.41. – P. 113–122.
10. Гайфулин, А.Р. Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня / А.Р. Гайфулин, Р.З. Рахимов, Н.Р. Рахимова // *Инженерно-строительный журнал*. – 2015. – № 7 (59). – С. 66–73.
11. Rakhimov, R.Z. Effect of the Addition of Thermally Activated Heavy Loam to Portland Cement on the Properties of Cement Stone / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gayfullin, V.P. Morozov // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2018. – Vol. 9, No. 4. – P. 679–686.
12. Низина, Т.А. Влияние добавок в портландцемент обожжённой глины на прочность цементного камня / Т.А. Низина, В.В. Володин, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – №3 (40). – С. 58–68.
13. Sabir, B.B. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review / B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai // *Cement and Concrete Composites*. – 2001. – Vol. 23. – P. 441–454.
14. Tironi, A. Kaolinitic calcined clays – Portland cement system: Hydration and properties / A. Tironi, C.C. Castellano, V.L. Bonavetti, M.A. Trezza // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 64. – P. 215–221.
15. Влияние термоактивированных глин и карбонатных пород на фазовый состав и свойства модифицированного цементного камня / Т.А. Низина, А.С. Балыков, В.В. Володин, В.М. Кяшкин, А.А. Ерофеева // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2019. – № 8 (728). – С. 45–55.
16. Antoni, M. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone / M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K. Scruver // *Cement and Concrete Research*. – 2012. – Vol. 42. – P. 1574–1589.

17. Композиционный цемент на основе портландцемента, известняка и прокалённой глины / М. Стеенберг, Д. Херфорт, С.Л. Поульсен, Й. Скибстед, Й.С. Дамтоф // Цемент и его применение. – 2014. – №5. – С. 44–49.

18. Кинетика ранних стадий твердения цементных систем с индивидуальными и комплексными добавками на основе термоактивированных полиминеральных глин, карбонатных пород и поликарбоксилатного суперпластификатора / Т.А. Низина, А.С. Бальков, В.В. Володин, Д.И. Коровкин, М.О. Карабанов // Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России. – 2019. – С. 174–178.

### References

1. Pyatnitsa, A.I. Features of the determination of wear and the assessment of the resource of the operated objects made of reinforced concrete. A.I. Pyatnitsa, G.V. Murashkin // Modern problems of science and education. – 2009. – No. 6–1.

2. Kalashnikov, V.I. Evolution of the development of compositions and changes in the strength of concrete. Concrete of the present and future / V.I. Kalashnikov // Building materials. – 2016. – No. 1–2. – P. 96–103.

3. Yu, R. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses / R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers // Cement and Concrete Composites. – 2015. – Vol. 55. – P. 383–394.

4. Ghafari, E. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra-high performance concrete / E. Ghafari, H. Costa, E. Julio, A. Portugal // Materials and Design. – 2014. – Vol. 59. – P. 1–9.

5. Tran, N.T. Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads / N.T. Tran, D.J. Kim // Cement and Concrete Composites. – 2017. – Vol. 78. – P. 132–145.

6. Pospelova, M.A. Regulation of the kinetics of hardening of cement systems with chemical additives: dis. ... Cand. of Sciences: 05.23.05 / Pospelova Marina Alekseevna. – Belgorod, 2003. – 129 p.

7. Brykov, A.S. Hydration of portland cement in the presence of highly reactive metakaolin / A.S. Brykov, S.A. Krasnobaeva, M.V. Mokeev // Materials Sciences and Applications. – 2015. – Vol. 6. – P. 391.

8. Gorbachev, B.F. State and development prospects in the Russian Federation of the raw material base of kaolin / B.F. Gorbachev // Industrial minerals: problems of forecasting, prospecting, evaluation and innovative technologies for the development of deposits: materials of the International Scientific and Practical Conference. – Kazan: JSC Publishing House «Kazan Real Estate», 2015. – P. 111–114.

9. Fernandez, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite / R. Fernandez, F. Martirena, K.L. Scrivener. // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol.41. – P. 113–122.

10. Gaifulin, A.R. Influence of glinit additives in Portland cement on the compressive strength of the cement stone / A.R. Gaifulin, R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova // Magazine of Civil Engineering. – 2015. – No. 7 (59). – P. 66–73.

11. Rakhimov, R.Z. Effect of the Addition of Thermally Activated Heavy Loam to Portland Cement on the Properties of Cement Stone / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gayfullin, V.P. Morozov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Vol. 9, No. 4. – P. 679–686.

12. Nizina, T.A. Influence of additives in baked clay Portland cement on the strength of cement stone / T.A. Nizina, V.V. Volodin, A.S. Balykov, D.I. Korovkin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 3 (40). – P. 58–68.

13. Sabir, B.B. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review / B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai // Cement and Concrete Composites. – 2001. – Vol. 23. – P. 441–454.

14. Tironi, A. Kaolinitic calcined clays – Portland cement system: Hydration and properties / A. Tironi, C.C. Castellano, V.L. Bonavetti, M.A. Trezza // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 64. – P. 215–221.

15. Influence of thermoactivated clays and carbonate rocks on the phase composition and properties of the modified cement stone / T.A. Nizina, A.S. Balykov, V.V. Volodin, V.M. Kyashkin, A.A. Erofeeva // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2019. – No. 8 (728). – P. 45–55.

16. Antoni, M. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone / M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K. Scruver // *Cement and Concrete Research*. – 2012. – Vol. 42. – P. 1574–1589.

17. Composite cement based on Portland cement, limestone and calcined clay / M. Steenberg, D. Herforth, S.L. Poulsen, J. Skibstead, J.S. Damtoff // *Cement and its application*. – 2014. – No. 5. – P. 44–49.

18. Kinetics of early stages of hardening of cement systems with individual and complex additives based on thermally activated polymineral clays, carbonate rocks and polycarboxylate superplasticizer / T.A. Nizina, A.S. Balykov, V.V. Volodin, D.I. Korovkin, M.O. Karabanov // *Topical issues of modern construction of industrial regions of Russia*. – 2019. – P. 174–178.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.01

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

**Комаров Виктор Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Болдырева Ольга Вячеславовна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: boov@yandex.ru

**Трегуб Александр Юрьевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: tregubalex@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

**Comarov Victor Aleksandrovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Professor of the department «Building  
Structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Boldyreva Olga Vajcheslavovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building Structures»  
E-mail: boov@yandex.ru

**Tregub Aleksander Yurievich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building Structures»  
E-mail: tregubalex@yandex.ru

### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСОЛЬНЫХ ОПОР БАЛОК С ПОДРЕЗКОЙ

В.А. Комаров, О.В. Болдырева, А.Ю. Трегуб

Сложное напряженно-деформированное состояние консольной опоры балки с подрезкой сведено к эквивалентному одноосному. Для получения качественной картины распределения напряжений выполнено компьютерное моделирование, позволяющее оценить сопротивление разрушению путем обрыва (растягивающие напряжения) и путем сдвига (касательные напряжения). Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния опытных образцов.

*Ключевые слова: многоэтажный каркас, балки с подрезкой, консольная опора, напряженно-деформированное состояние, главные напряжения, распределение*

### STRESS-STRAIN STATE of CANTILEVER SUPPORTS OF BEAMS WITH TRIMMING

V.A. Komarov, O.V. Boldyreva, A.Yu. Tregub

The complex stress-strain state of the cantilever support of a beam with trimming is reduced to the equivalent uniaxial one. To obtain a qualitative picture of stress distribution, computer simulations

were performed to estimate fracture resistance by breaking (tensile stresses) and by shear (tangential stresses). The results of the study of the stress-strain state of the prototypes are presented.

*Keywords: multi-storey frame, beams with trimming, cantilever support, stress-strain state, main stresses, distribution*

Обобщенные характеристики прочности бетона принято представлять в виде предельных поверхностей разрушения, для построения которых требуется проведение большого количества сложных экспериментов. Поэтому на практике используются критерии прочности, полученные упрощенной гипотезой разрушения при сложном напряженно-деформированном состоянии. При этом при принятых критериях прочности любое сложное напряженное состояние сводится к эквивалентному одноосному напряжению. Детальная оценка напряженно-деформированного состояния при испытании натуральных образцов консольных опор балок практически невозможна ввиду сложности установления величины напряжений в каждой точке пространственного элемента, поэтому для решения данной задачи использованы компьютерные модели образцов (рис. 1). При моделировании применены универсальные пространственные восьмиузловые изопараметрические конечные элементы КЭ-36 в ПК Лира 9.6. Приняты характеристики бетона с начальным модулем упругости  $E_v=30000$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu=0,2$ . Арматура моделировалась стержневыми конечными элементами с учетом коэффициента приведения  $a=E_s/E_b$ .

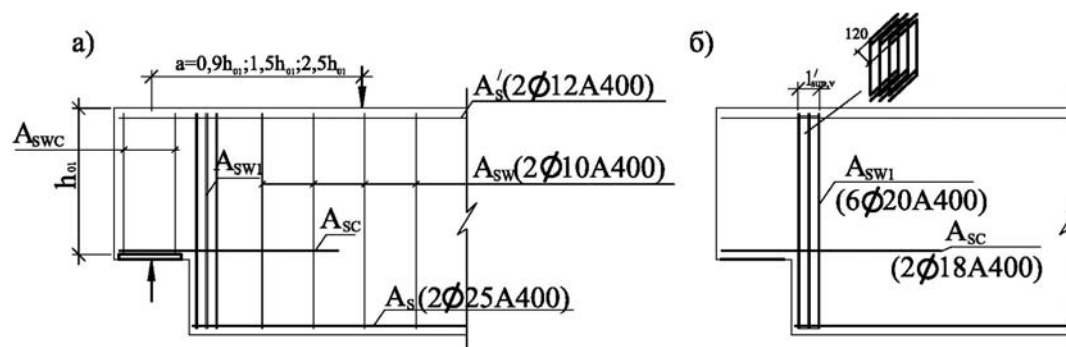


Рис. 1. Опытные образцы:

а – конструктивное решение, схема приложения нагрузки;

б – фрагмент армирования подрезки короткой консоли

При моделировании расчетной схемы сделаны следующие допущения:

- бетон в приопорной части ригеля находится в условиях плоского напряженного состояния;

- используется фактическая схема армирования, в расчетной схеме применяются два материала со своими модулями деформации;

- сечение арматуры учитывается при коэффициенте приведения  $a=E_s/E_b$ .

Загружение образцов произведено симметрично сосредоточенными силами с пролетами среза  $a=0,9h_{01}$ ;  $a=1,5h_{01}$ ;  $a=2,5h_{01}$ .

При анализе результатов моделирования основное внимание обращено на качественную картину напряженно-деформированного состояния. В результате анализа установлено: при небольших пролетах среза  $a \leq 0,9h_{01}$  главные сжимающие напряжения  $\sigma_1$  концентрируются в наклонной полосе между грузовой и опорной площадками с максимальными значениями над опорной площадкой вблизи входящего угла подрезки (рис. 2).

Главные растягивающие напряжения  $\sigma_2$  концентрируются в зоне входящего угла подрезки в узле сопряжения продольной арматуры короткой консоли  $A_s$  с первым сосредоточенным хомутом  $A_{sw1}$  с максимальным развитием по высоте подрезки к узлу сопряжения сосредоточенных хомутов с арматурой  $A_s$  балки (рис. 3).

При распределении нормальных напряжений  $\sigma_y$  зона максимальных напряжений расположена по высоте подрезки в сосредоточенных хомутах  $A_{sw1}$  между узлами сопряжения с продольной арматурой консоли  $A_{sc}$  и ригеля  $A_s$  (рис. 4).



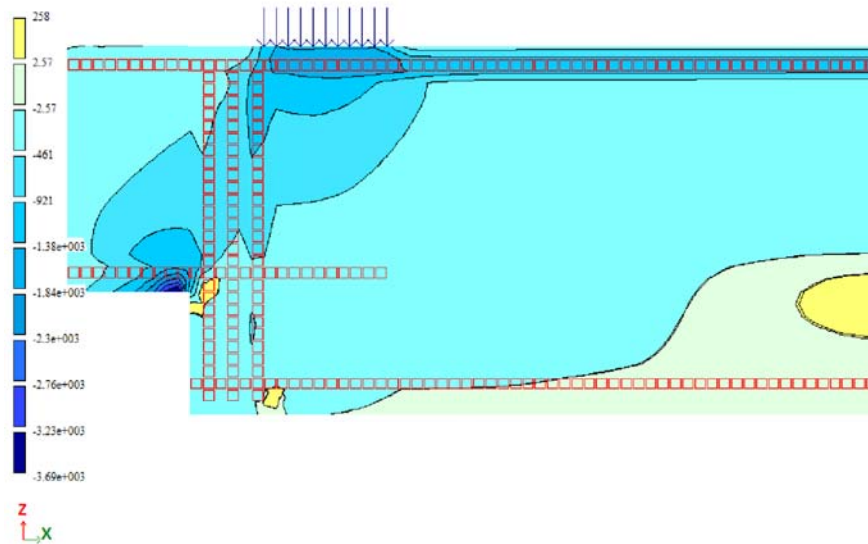


Рис. 2. Изополя главных сжимающих напряжений  $\sigma_1$  при пролете среза  $a=0,9h_{01}$

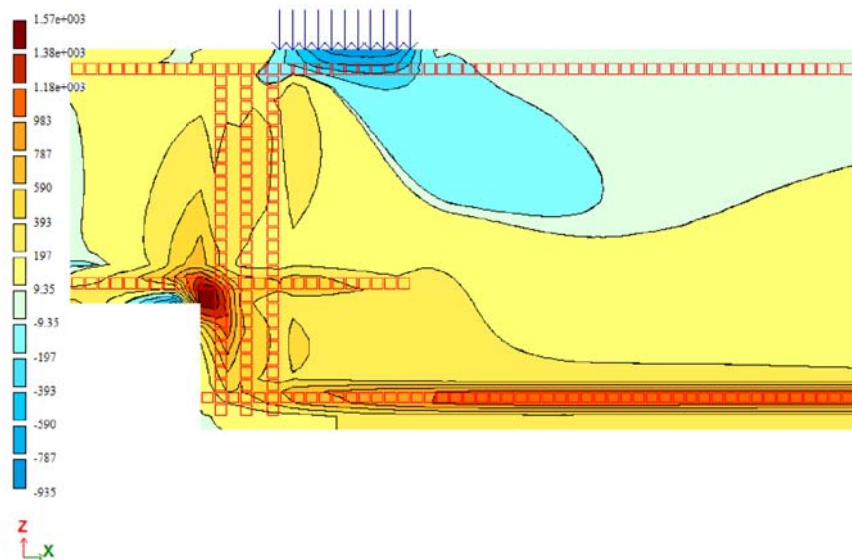


Рис. 3. Изополя главных растягивающих напряжений  $\sigma_2$  при пролете среза  $a=0,9h_{01}$

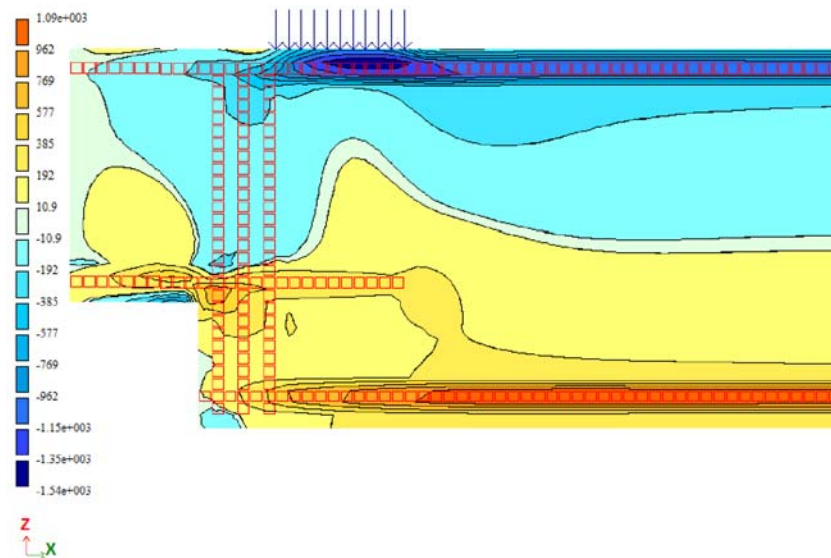


Рис. 4. Изополя нормальных напряжений  $\sigma_y$  при пролете среза  $a=0,9h_{01}$

При распределении нормальных напряжений  $\sigma_x$  зона максимальных напряжений расположена в узле пересечения продольной арматуры короткой консоли  $A_{sc}$  с вертикальными хомутами  $A_{sw1}$  (рис. 5).

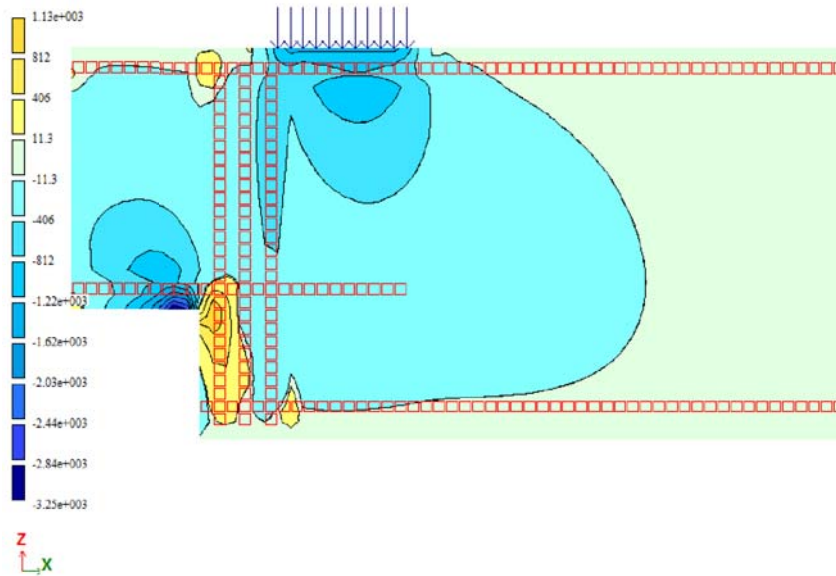


Рис. 5. Изополя нормальных напряжений  $\sigma_x$  при пролете среза  $a=0,9h_{01}$

Касательные напряжения  $\tau_{xy}$  концентрируются на краевых участках опорной и грузовой площадок с развитием по вертикальным сечениям вдоль сосредоточенных хомутов  $A_{sw1}$  с максимальными значениями на краевых участках опорной площадки входящего угла подрезки, т.е. в местах концентрации нормальных напряжений  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  (рис. 6).

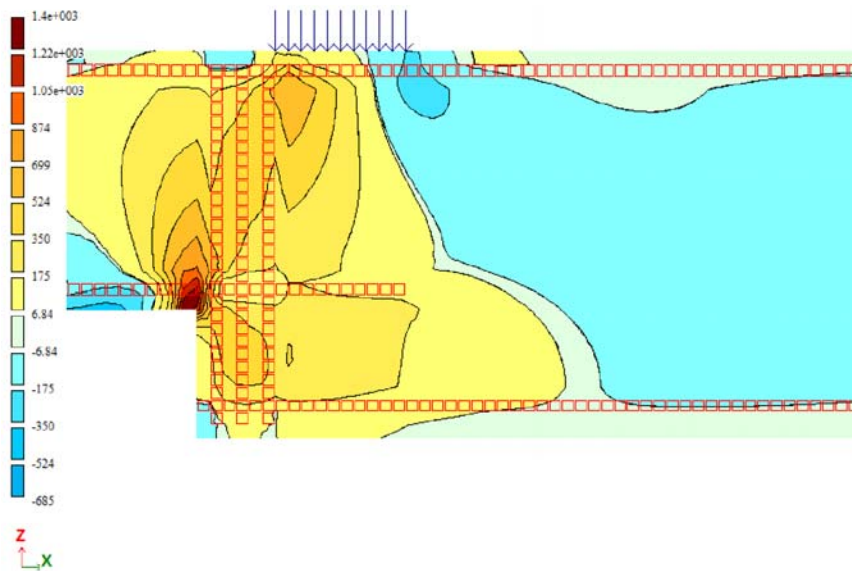


Рис. 6. Изополя напряжений  $\tau_{xy}$  при пролете среза  $a=0,9h_{01}$

При увеличении пролета среза до  $a=1,5h_{01}$  изменяется распределение главных сжимающих напряжений. Главные сжимающие напряжения концентрируются над опорной площадкой с развитием по направлению к условной грузовой площадке (узлу пересечения  $A_{sw1}$  с  $A'_s$ ), а главные напряжения под грузовой площадкой направлены при своем развитии на условную опорную площадку (узел пересечения  $A_{sw1}$  с  $A_s$ ) (рис. 7).

Качественная картина главных растягивающих напряжений подобна распределению при пролете среза  $a=0,9h_{01}$  (рис. 8).

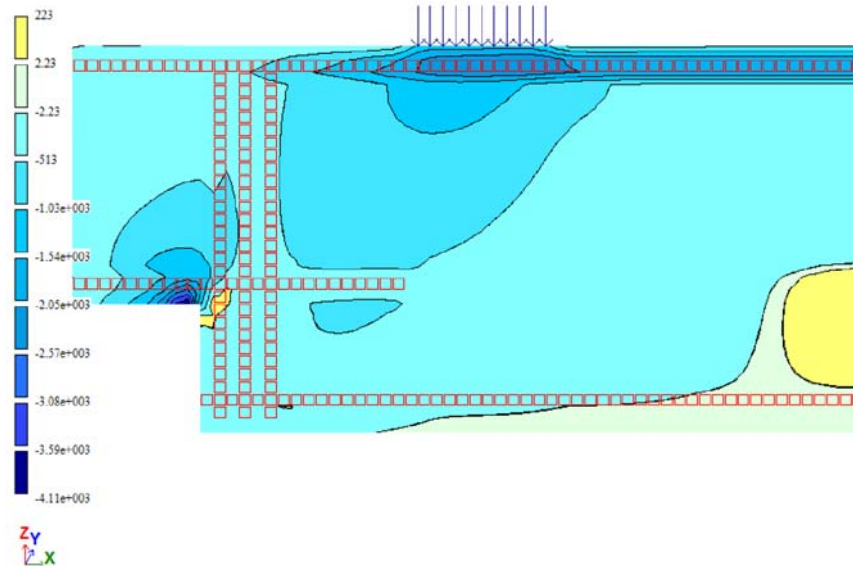


Рис. 7. Изополя главных сжимающих напряжений  $\sigma_1$  при пролете среза  $a=1,5h_{01}$

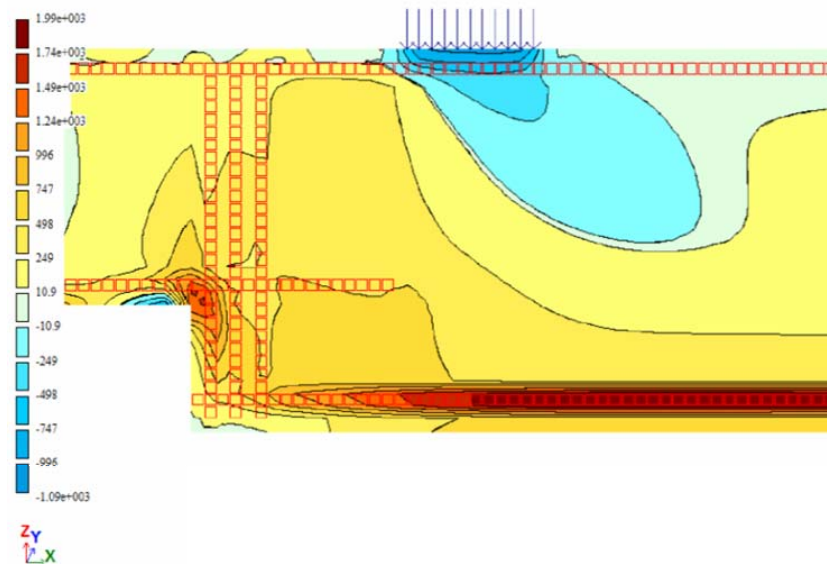


Рис. 8. Изополя главных растягивающих напряжений  $\sigma_2$  при пролете среза  $a=1,5h_{01}$

Распределение касательных напряжений при пролете среза  $a=1,5h_{01}$  имеет следующие особенности. Касательные напряжения концентрируются только на краевом участке опорной площадки короткой консоли и направлены вдоль сосредоточенных хомутов (рис. 9), то есть в местах максимальных значений нормальных растягивающих напряжений  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  (рис. 10 и 11).

При пролетах среза  $a=2,5h_{01}$  распределение главных напряжений качественно не изменяется. Главные сжимающие напряжения  $\sigma_1$ , как и при средних пролетах среза, сосредоточены у опорной и грузовой площадок, главные растягивающие напряжения концентрируются в узле пересечения продольной арматуры консоли  $A_{sc}$  с вертикальными хомутами входящего угла подрезки.

Распределение касательных напряжений  $\tau_{xy}$  по высоте консоли вдоль сосредоточенных хомутов остается неизменным, подобно концентрации напряжений при малых и средних пролетах среза с максимальными значениями на краевых участках опорной площадки короткой консоли, они направлены вдоль сосредоточенных хомутов (рис. 12) в местах максимальных значений нормальных напряжений  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$ .

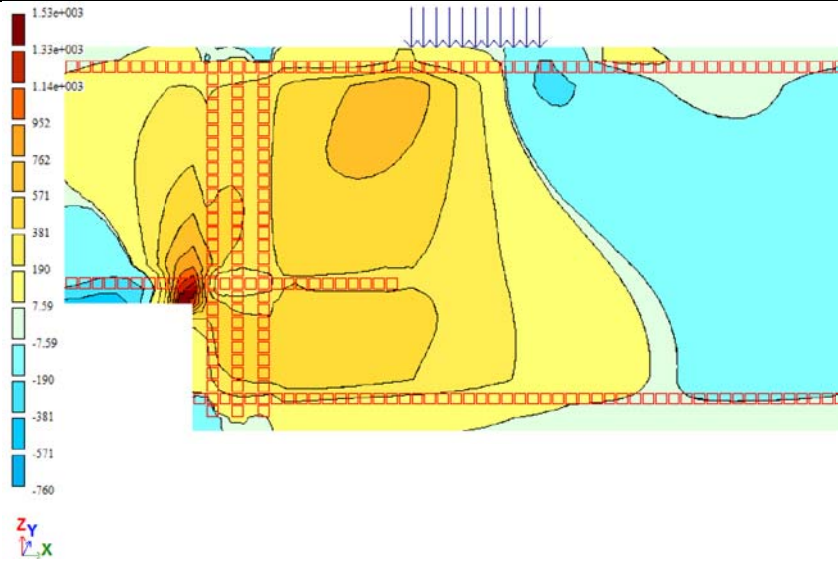


Рис. 9. Изополя напряжений  $\tau_{xy}$  при пролете среза  $a=1,5h_{01}$

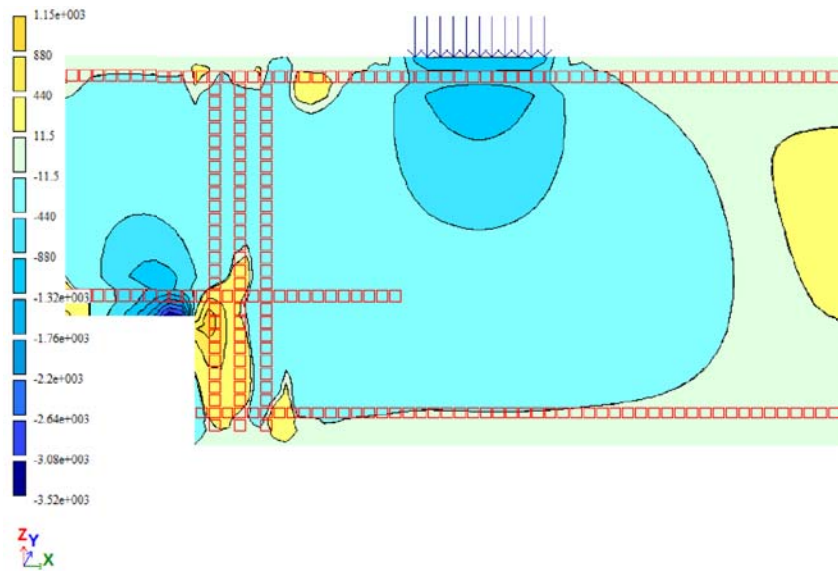


Рис. 10. Изополя нормальных напряжений  $\sigma_y$  при пролете среза  $a=1,5h_{01}$

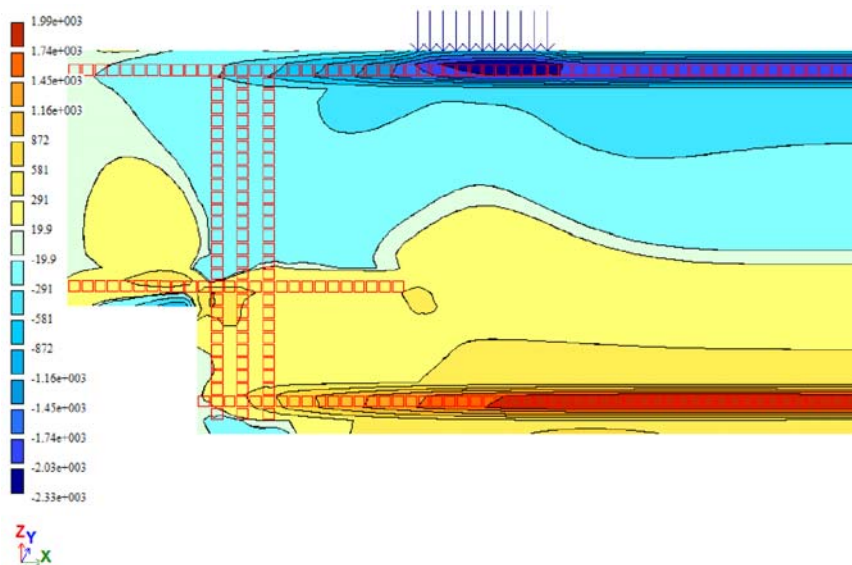


Рис. 11. Изополя нормальных напряжений  $\sigma_x$  при пролете среза  $a=1,5h_{01}$

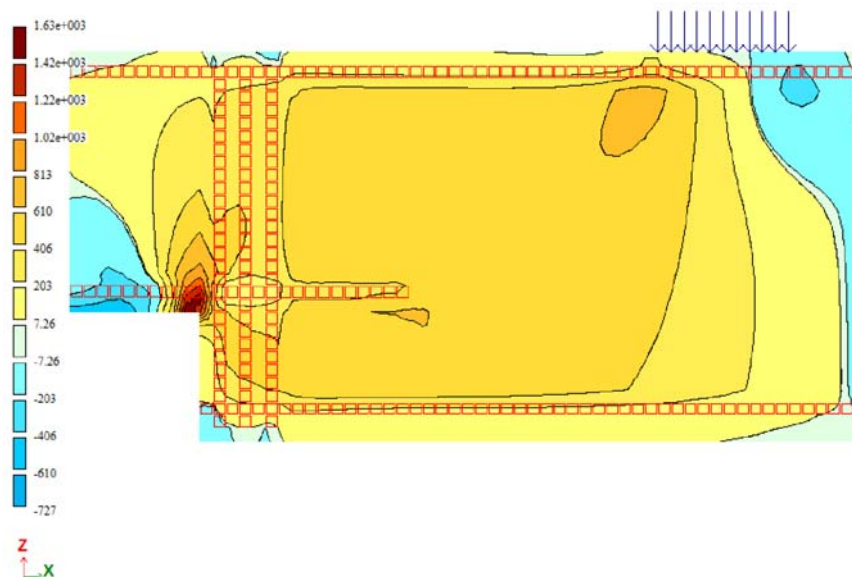


Рис. 12. Изополя напряжений  $\tau_{xy}$  при пролете среза  $a=2,5h_{01}$

Рассмотренное распределение напряжений в опорной части балки с подрезкой при наличии условных грузовых и опорных площадок позволяет оценить сопротивление бетона в короткой консоли при изменении пролета среза между физическими опорной и грузовой площадками.

Жесткие узлы сопряжения сосредоточенной поперечной арматуры с продольной арматурой балки являются условными грузовыми и опорными площадками.

Верхняя условная площадка служит опорой короткой консоли, нижняя – опорой ригеля. Между условными площадками концентрируются растягивающие нормальные напряжения  $\sigma_y$ , в направлении которых происходит резкое возмущение касательных напряжений  $\tau_{xy}$ .

Основное влияние на сопротивление бетона консольных опор балок с подрезкой оказывают главные сжимающие напряжения, действующие в наклонной сжатой полосе между опорной и грузовой площадками при пролетах среза  $a \leq 1,5h_{01}$ , и касательные напряжения, действующие по вертикальному сечению короткой консоли вдоль сосредоточенных хомутов независимо от пролета среза.

#### Вывод

На прочность бетона консольной опоры при малых пролетах среза  $a \leq 0,9h_0$  оказывают влияние главные сжимающие напряжения, при пролетах среза  $a > 0,9h_0$  – касательные напряжения совместно с нормальными.

#### Список литературы

1. Баранова, Т.И. Расчетные модели сопротивления срезу сжатых зон железобетонных конструкций / Т.И.Баранова. – Саратов: СГТУ, 2006. – 159 с.
2. Карпенко, С.Н. Об общем подходе к построению прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил / С.Н. Карпенко // Бетон и железобетон. – 2007. – №2. – С.21–27.
3. Комаров, В.А. Физический эксперимент консольных опор железобетонных ригелей многоэтажных каркасов / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Материалы VIII Академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции. – Казань, 2014. – С.122–125.
4. Комаров, В.А. Экспериментальная теория сопротивления ригелей с подрезкой: монография / В.А. Комаров. – М.: Спутник+, 2013. – 199 с.

## References

1. Baranova, T.I. Computational models of shear resistance of compressed zones of reinforced concrete structures / T.I. Baranova. – Saratov: SSTU, 2006. – 159 p.
2. Karpenko, S.N. On a General approach to the construction of the strength of reinforced concrete elements under the action of transverse forces / S.N. Karpenko // Concrete and reinforced concrete. – 2007. – No. 2. – P. 21–27
3. Komarov, V.A. Physical experiment of cantilever supports of reinforced concrete crossbars of multi-storey frames / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva // Materials of the VIII Academic readings of the RAASN-International scientific and technical conference. – Kazan, 2014. – P. 122–125
4. Komarov, V.A. Experimental theory of resistance of crossbars with pruning: monograph / V.A. Komarov. – M.: Sputnik+, 2013. – 199 p.

УДК 624.12.4

*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

**Гучкин Игорь Сергеевич**,  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Ласьков Николай Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

*Penza State University of Architecture and Construction*

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

**Guchkin Igor Sergeevich**,  
Candidate of Sciences, Professor  
of the department «Building Structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Laskov Nikolay Nikolaevich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Building Structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ПОПЕРЕЧНИКА ОДНОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ КАРКАСНОГО ТИПА

И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков

Рассматривается конструкция поперечника одноэтажного здания каркасного типа. Поперечник состоит из двух замкнутого профиля железобетонных рам, объединенных стропильной балкой. Одна из стоек рамы выполняет функцию колонны, а другая – фахверка и служит для крепления стеновых панелей. Верхний ригель рамы используется как часть стропильной балки, а нижний – как распорная балка. Имея консольный выступ, нижний ригель может воспринимать нагрузку от стеновых панелей. Колонны базируются на фундаменте мелкого заложения глубиной 40...80 см.

*Ключевые слова: одноэтажное здание, каркас, железобетонная рама, стропильная балка, колонна, фундамент мелкого заложения*

## THE DESIGN OF CROSS SECTION STRUCTURES OF ONE STONEY BULDING OF FRAME TYPE

I.S. Guchkin, N.N. Laskov

The design of the cross-section structures one-story building of frame type is considered. The cross-section consists of two closed profile of reinforced concrete frames united on top by a rafter beam. One of the frame support serves as a column, and the other – half-timbered and serves for fixing wall panels. The upper crossbar of the frame is used as a rafter and the lower crossbar is used as a spacer. With a cantilever protrusion, it can perceive loading from wall panels. The columns are based on a shallow foundation with a depth of 40 ... 80 cm.

*Keywords: one-story building, frame, reinforced concrete frame, rafter beam, column, shallow foundation*

При строительстве зданий в районах с глубиной промерзания грунта 1,4 м и более значительные материальные средства расходуются на устройство фундаментов под наружные стены.

В разработанной с участием сотрудников кафедры СК ПГУАС конструкции поперечника каркаса производственного здания (рис. 1) фундаменты под наружными стенами отсутствуют, их заменяют консольные выступы рам, на которые опираются стеновые панели. Фундаменты несущих стоек рам размещаются под зданием и располагаются на значительном (3 м и более) расстоянии от наружных стен, т.е. оказываются вне зоны промерзания грунта. Это позволяет использовать фундаменты мелкого заложения (ФМЗ) с глубиной подошвы 40...80 см [1]. В результате экономятся как трудовые, так и строительные ресурсы. Такие фундаменты не требуют

большого количества бетона и толстого слоя песка (щебня) для засыпки. Затраты на ФМЗ снижаются в два-три раза.

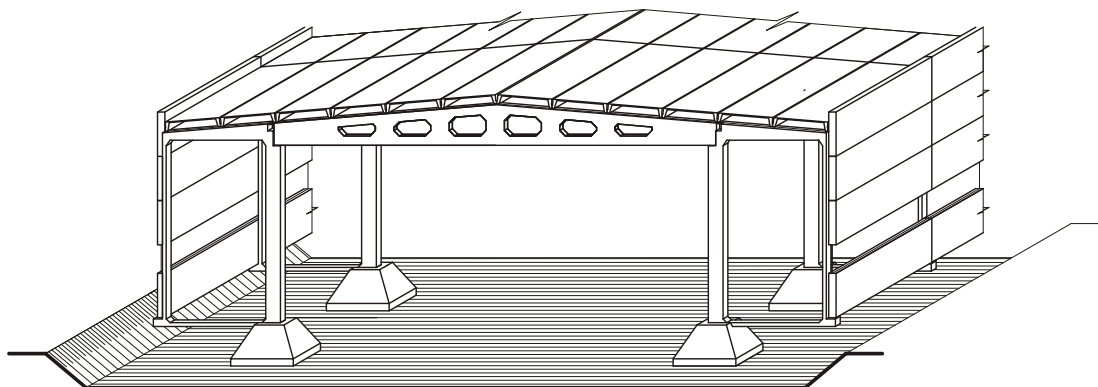


Рис. 1. Фрагмент здания и конструктивные элементы поперечника

### Конструкция поперечника

Поперечник здания, в отличие от традиционного [2], состоит из двух замкнутых железобетонных рам, объединенных поверху стропильной балкой. Рамы цельные, заводского изготовления, состоят из двух стоек и ригелей. Одна из стоек выполняет функцию колонны, а другая – фахверка, служит для крепления стеновых панелей. Верхний ригель рамы используется как стропильная балка, а нижний – как распорная.

Особенностью конструкции поперечника является отсутствие колонн. Стойка рамы, выполняющая функцию колонны, воспринимает нагрузку от покрытия и опирается на отдельный фундамент, где фиксируется анкерным болтом и замоноличивается в стакане. Рабочая арматура верхних ригелей соединяется на сварке с рабочей арматурой стропильной балки, образуя неразрезную конструкцию. Из-за отсутствия под наружными стенами фундамента верхние ригели рам в эксплуатационном режиме работают по схеме консольных балок, нагруженных вертикальной нагрузкой от покрытия и стен. Горизонтальная сила от ветрового напора воспринимается стеновыми панелями и фахверковыми стойками рам. В среднем пролете здания возможна установка кран-балки грузоподъемностью до 3 т. На рис. 1 изображен поперечник каркаса в составе фрагмента здания, включающий поперечные рамы ПР1, стропильную балку СБ12 и фундамент, отличающийся от типового наличием паза и анкерного болта. Здесь же показаны стеновые панели из ячеистого бетона и ребристые плиты покрытия.

Для выявления качественной картины напряженного состояния элементов здания проанализирована совокупность факторов, физических и технологических [3], влияющих на технико-экономические показатели; выполнен статический расчет трехпролетного поперечника здания, состоящего из двух рам ПР-1 замкнутого профиля, объединенных поверху ригелем (стропильной балкой). На рис. 2 приведена расчетная схема поперечника здания (г. Пенза, шаг рам 6 м) и показана огибающая эпюра моментов в его элементах.

Анализ распределения усилий в поперечнике показал, что максимальные изгибающие моменты образуются над опорными стойками и в пролете. Изгибающие моменты в стойках и нижних ригелях рам в целом невелики. При этом наружные стойки рам в основном работают на внецентренное растяжение, а внутренние (опорные) – на внецентренное сжатие. В нижнем ригеле – внецентренное сжатие при действии ветровой нагрузки на стену.

Проблематичной, из-за большого изгибающего момента и, соответственно, большой площади сечения стыкуемых стержней, является зона сопряжения стропильной балки с рамой ПР-1. Однако если в расчете учитывать пластические свойства арматурной стали, то величину момента, а соответственно и площадь сечения рабочей арматуры можно снизить на 30 %. При этом несколько возрастет пролетный момент в



стропильной балке, что практически не усложнит ее армирование. Схема распределения усилий и армирование узла рамы в зоне стыка с балкой показаны на рис. 3.

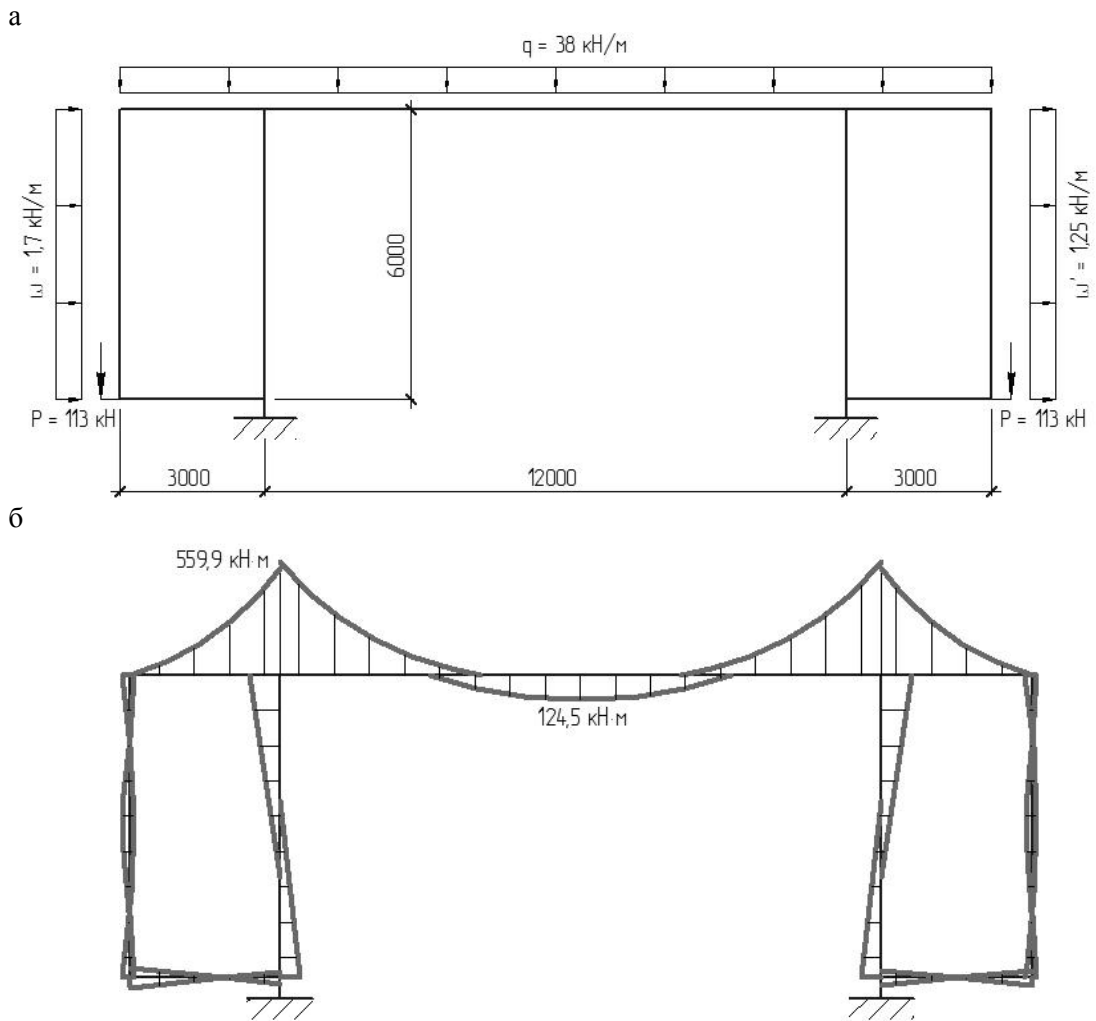


Рис. 2. Расчетная схема поперечника:  
а – схема нагружения; б – огибающая эпюра моментов

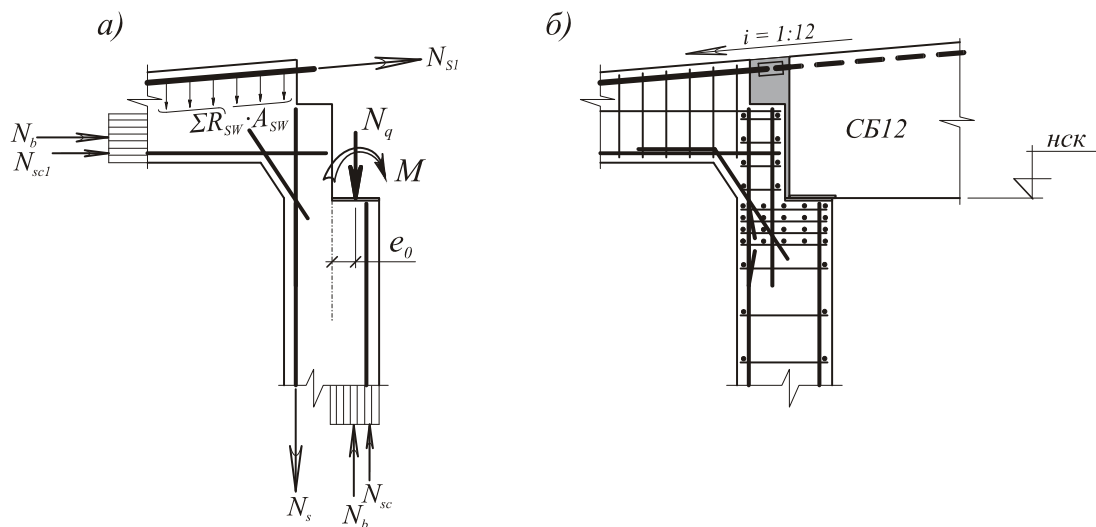


Рис. 3. Узел сопряжения рамы ПР-1 и стропильной балки СБ12:  
а – схема усилий в зоне стыка; б – армирование рамы в зоне стыка

На рис. 4 изображена конструкция рамы ПР-1 для здания с отметкой низа стропильной конструкции 4,8 м.

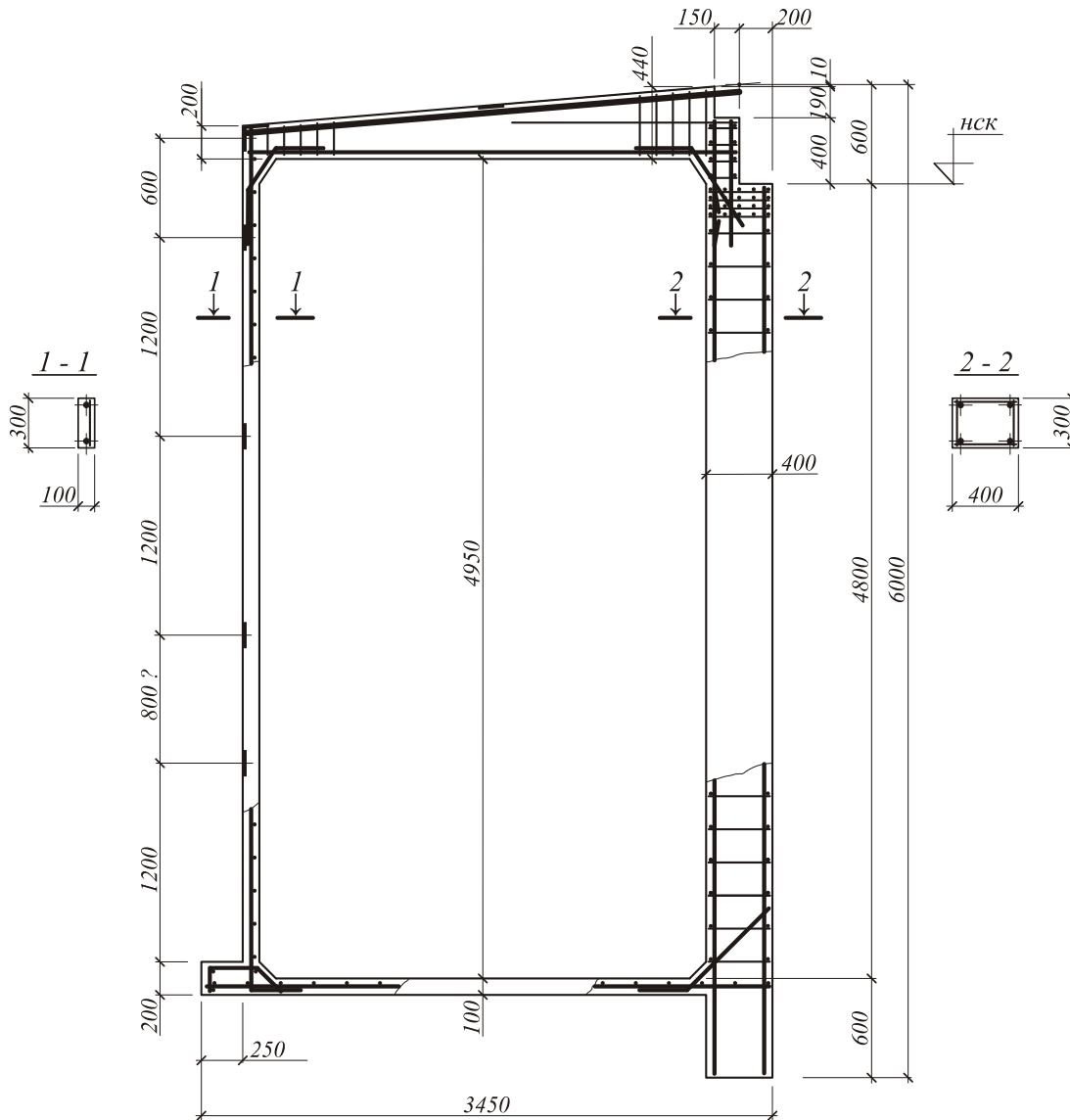


Рис. 4. Конструкция рамы ПР-1

Стропильная балка поперечника решетчатого типа, двускатная, в отличие от типовой выполнена по неразрезной схеме. Имеет рабочую арматуру над опорой и в пролете. Высота сечения на опоре 600 мм, а в середине пролета (при уклоне 1:12) 1100 мм.

Определение координаты расположения опасного расчетного сечения балки в пролете выполняется в следующем порядке:

- задают геометрические параметры балки, классы бетона и арматуры;
- учитывая пластическую деформацию арматуры, снижают (на 30 %) опорный момент ( $M_1 = 0,7 M_{оп}$ ), а затем находят координату точки пересечения трансформированной эпюры моментов с осью «X» (рис. 5).

Решают уравнение квадратной параболы

$$-\frac{qx^2}{2} + \frac{qlx}{2} - M_1 = 0.$$

После преобразования  $ax^2 + bx + c = 0$ , где  $a = -\frac{q}{2}$ ;  $b = \frac{ql}{2}$ ;  $c = -M_1$ .

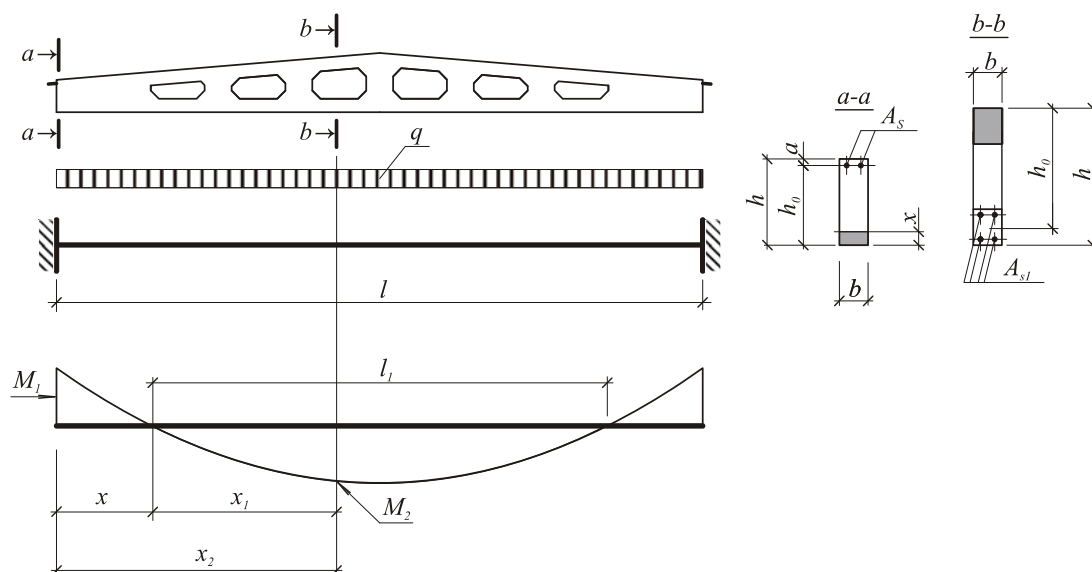


Рис. 5. Расчетная схема стропильной балки

Дискриминант  $D = b^2 - 4ac$ .

Расстояние от опоры до точки пересечения эпюры моментов с осью «X» (нулевая точка)

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}$$

Длина участка между нулевыми точками  $l_1 = l - 2x$ .

При уклоне верхнего пояса балки 1:12 расстояние ( $x_1$ ) от нулевой точки до опасного расчетного сечения находят из уравнения

$$2x_1^2 + 2x_1 l_1 - l_1^2 = 0, \text{ откуда } x_1 = 0,37 l_1.$$

Изгибающий момент в опасном сечении

$$M_2 = q x_1 (l_1 - x_1) / 2.$$

Расстояние от опоры до опасного сечения

$$x_2 = x + x_1.$$

Площадь сечения рабочей арматуры, обычной и предварительно напряженной, расположенной в расчетных сечениях балки, находят по формулам Свода правил [4]. Эскиз армирования стропильной балки показан на рис. 6.

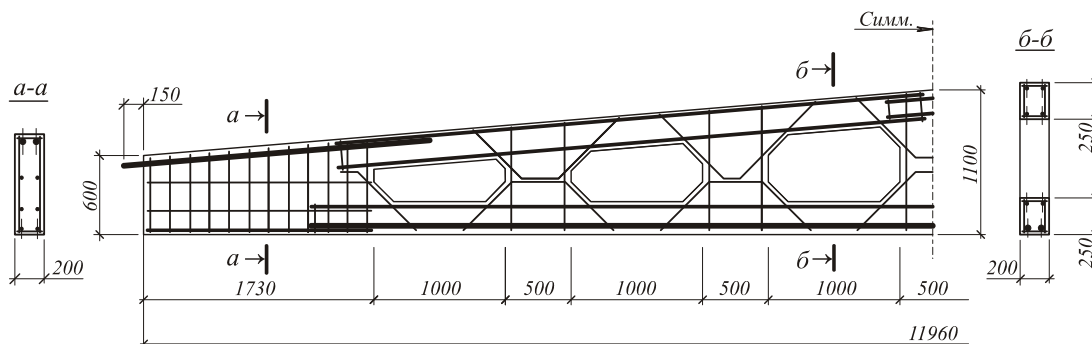


Рис. 6. Стропильная балка СБ12. Схема армирования

Новая конструкция поперечника производственного здания в сравнении с традиционной имеет ряд преимуществ. Так, например, при одинаковой ширине здания 18 м расход материалов на конструкцию поперечника шириной  $3 \times 2 + 12$  м (вариант 1) и  $1 \times 18$  м (вариант 2) различен, а именно: в первом варианте по сравнению со вторым

расход бетона ниже на 31 %, расход арматуры – на 7,5 % (см. таблицу). Кроме того, в первом варианте за счет применения фундаментов мелкого заложения на 50-60 % сокращается объем земляных работ.

#### Технические параметры конструкций поперечника здания

Показатели	Ед. изм.	Вариант 1			Вариант 2		
		ПР-1 (2 шт) Бетон кл. В30	СБ12 Бетон кл. В30	Итого	Колонна 1К60.3-3 (2 шт.) Бетон кл. В25	Балка ЗБДР18- 5АIV Бетон кл. В30	Итого
Объем бетона	м <sup>3</sup>	1,17×2=2,34	1,68	4,02	0,54×2=1,08	4,84	5,92
Расход арматуры	кг	128,3×2=256,6	484	740,6	66,41×2= 132,82	668,2	801,02
Вес конструкций	тс	2,93×2=5,86	4,2	10,06	1,35×2=2,7	12,1	14,8

Примечание. Марки колонны и балки соответствуют сериям 1.823.1 и 1.462.1.

#### Выводы

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования конструкции поперечника здания является увеличение крайних пролетов до 4 м, что может быть достигнуто за счет снижения нагрузки, применения облегченного стенового ограждения из трехслойных панелей типа «сэндвич», утепленных пенополиуретаном, и плит покрытия из ячеистого бетона.

Конструкция поперечника здания конкурентоспособна в сравнении с другими известными отечественными и зарубежными аналогами. Максимальный экономический эффект можно получить при строительстве зданий на пылеватых и глинистых грунтах, подверженных морозному пучению.

#### Список литературы

1. СП 355.1325800.2017. Конструкции каркасные железобетонные сборные одноэтажных зданий производственного назначения. – М.: АО «ЦНИИПромзданий», 2018.
2. Гучкин, И.С. Здание для ремонта сельхозтехники в Поволжском регионе / И.С. Гучкин, И.Г. Бережков // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. – Пенза, 2017. – С. 26–30.
3. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5-8. – P. 219–225.
4. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. Свод правил. – М., 2004.

#### References

1. SP 355.1325800.2017. Prefabricated frame reinforced concrete structures for one-storey buildings for industrial purposes. – М.: JSC «TsNIIPromzdaniy», 2018.
2. Guchkin, I.S. Building for the repair of agricultural machinery in the Volga region / I.S. Guchkin, I.G. Berezhkov. // Effective building structures: theory and practice: Sat. – Penza, 2017. – P. 26–30.
3. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, №. 5–8. – P. 219–225.
4. SP 52-101-2003. Concrete and reinforced concrete structures without prestressing reinforcement: code of rules. – М., 2004.

УДК 624.072

*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

**Городнов Игорь Игоревич,**  
аспирант кафедры «Механика»  
E-mail: i.gorodnov28@yandex.ru

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

**Монахов Владимир Андреевич,**  
доктор технических наук, профессор  
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

**Gorodnov Igor Igorevich,**  
Postgraduate of the department «Mechanics»  
E-mail: i.gorodnov28@yandex.ru

**Shein Aleksander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Mechanics»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

**Monakhov Vladimir Andreevich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Mechanics»

## ОБЗОР РАБОТ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ И РАЦИОНАЛЬНОМУ КОНСТРУИРОВАНИЮ КОМПОЗИТНЫХ БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ

И.И. Городнов, А.И. Шейн, В.А. Монахов

Приведен обзор работ по оптимизации армирования и конструирования балочных систем. Рассмотрены различные подходы к оптимальному и рациональному проектированию, выявлены достижения и недостатки полученных решений. Определены особенности оптимизации стержневого и распределенного (фибрового) армирования перекрестных балочных систем. Выявлены актуальные проблемы, связанные с оптимизацией перекрестных композитных систем.

*Ключевые слова:* балки, железобетон, фибробетон, перекрестные системы, арматура, фибра, оптимизация

## REVIEW OF THE RESEARCH ON OPTIMAL AND RATIONAL DESIGN OF COMPOSITE MATERIALS BEAM SYSTEMS

I.I. Gorodnov, A.I. Shein, V.A. Monakhov

The article provides an overview of the works on optimization of reinforcement and construction of beam systems. Various approaches to optimal and rational design are considered, achievements and shortcomings of the received solutions are revealed. The features of optimization of rod and distributed (fiber) reinforcement of cross-beam systems are determined. Actual problems related to the optimization of cross-composite systems are identified.

*Keywords:* beams, reinforced concrete, fiber concrete, cross systems, reinforcement, fiber, optimization

**Введение.** Перекрестные перекрытия представляют собой системы балок или ферм с параллельными поясами, перекрещивающихся в двух направлениях (рис. 1).

По своей работе такое покрытие приближается к работе сплошной плиты. Конструкции, в которых применены балки, называют перекрестно-ребристыми. Использование перекрестно-ребристых систем зачастую позволяет решить задачу оптимального, рационального и логически обоснованного устройства перекрытий даже при достаточно сложных объемно-планировочных решениях зданий. Системы несущих перекрестных балок можно эффективно использовать для перекрытия целых зданий и сооружений (крупных общественных, спортивных, торговых) либо отдельных помещений при самых разнообразных очертаниях в плане. Перекрестными балкам пере-

крывают пролеты до 30 м, однако в одноэтажных облегченных перекрытиях величина пролета может увеличиваться. Балки перекрестной системы можно предусмотреть как в монолитном, так и в сборном варианте, и каждый из них имеет и достоинства, и недостатки.

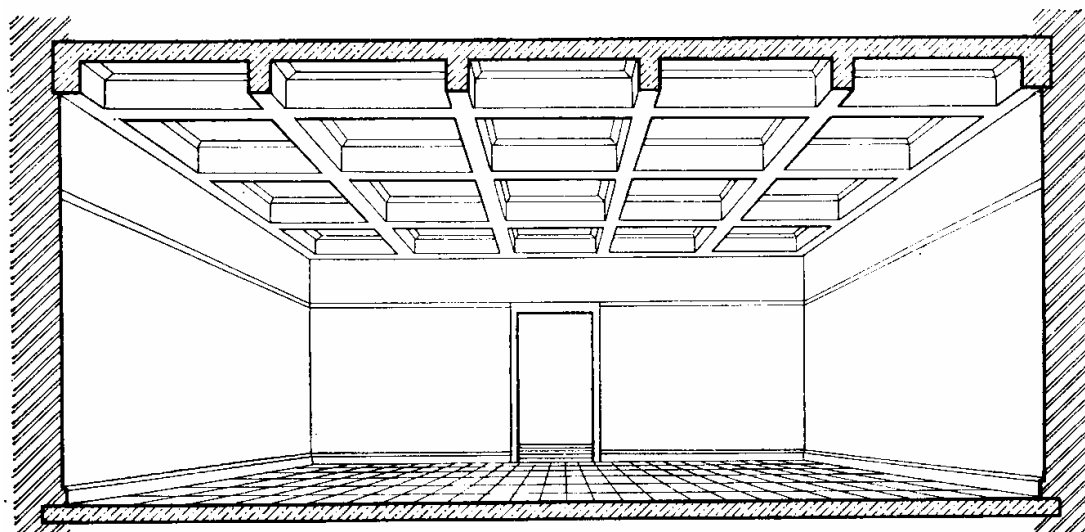


Рис. 1. Система перекрестных балок

Перекрестные конструкции, имея пространственный характер работы, позволяют снизить общую строительную высоту перекрытия и сократить расход материалов. Пространственный характер работы балок, соединенных между собой в точках пересечения, заключается в том, что нагрузка, приложенная к любой из балок, вызывает деформирование, а следовательно, противодействие этой нагрузке всей системы балок в целом. Наличие несущих пересекающихся элементов позволяет нагрузку на перекрытие передавать на опоры не в одной вертикальной плоскости, как в плоскостных конструкциях, а сразу в двух и даже в трех вертикальных плоскостях. Перекрестные балочные системы часто выполняются из железобетона, но в настоящее время широкое распространение получает такой композитный материал, как фибробетон. Фибробетон – разновидность цементного бетона, в котором в качестве армирующего материала выступают фибры (волокна). Материалом для фибр может служить сталь, стекловолокно, углеволокно, волокна полипропилена, волокна базальта, волокна бора и т.п.

При строительстве и проектировании большую часть армирования (до 80 % от общей массы армирования каркаса) включают в себя перекрытия. В связи с этим актуальной является проблема оптимального проектирования перекрытий зданий и сооружений, и в частности, проблема оптимизации расходов арматуры или фибры. Ведь зачастую перекрытия выполняются значительно переармированными, что ведет к увеличению стоимости конструкции и ее собственного веса.

В связи с этим задачей настоящего исследования является определение современного состояния имеющихся достижений и нерешенных вопросов, проблемы оптимального проектирования балочных (в частности перекрестных балочных) систем.

**Современное состояние и степень изученности вопроса.** По теме «Системы перекрестных балок из композитных материалов» научные работы и исследования практически отсутствуют. Но по отдельным частям данного вопроса, таким, как «Расчеты систем перекрестных балок», «Конструирование и армирование балок», литература есть, что позволяет в той или иной степени при изучении основного вопроса опираться на предыдущий опыт исследований.

По вопросу расчета систем перекрестных балок стоит выделить несколько научных работ.

Игнатюк В.И. и Алексеев Т.Ю. создали компьютерную программу статического расчета систем перекрестных балок методом конечных элементов с учетом упругой податливости присоединения элементов к узлам [2].

Определением прогибов и частот собственных колебаний систем перекрестных балок с учетом податливости узловых соединений занимались А.В. Турков и А.А. Макаров [3].

Викулов М.А. разработал эффективную методику оценки несущей способности перекрестных стержневых систем численным методом предельного равновесия на основе комплексного использования статического и кинематического подходов с применением алгоритма линейного программирования, позволяющую устранить обычный для нелинейных задач недостаток множественности решений [4].

По вопросу конструирования и армирования балочных систем также можно выделить ряд научных статей.

Авторами Н.С. Меньшиковой и Г.В. Коваленко был проведен численный эксперимент с целью оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных балок со смешанным армированием и выполнен анализ результатов [5].

Дау Тьеколо исследует влияние положения и интенсивности продольного армирования на несущую способность и характер разрушения наклонных сечений железобетонных балок при одновременном действии изгибающего момента и поперечной силы и на этой основе уточняет и совершенствует методики расчета [6].

Турков А.В., Макаров А.А., Ветрова О.А. провели экспериментальное исследование системы перекрестных балок на квадратном плане с размером ячеек  $0,4 \times 0,4$  м с покрытием при изменении схемы опирания. В ходе эксперимента проводились статистические и динамические испытания, в результате которых были найдены максимальный прогиб и частота собственных колебаний системы [7].

Винюкова И.Н. и Ходыкина И.В. в [8] приводят результаты решения задачи расчета для дисперсно-армированного материала в вариационной постановке. В качестве варьируемых параметров принимаются модули упругости композитного материала, зависящие от физических свойств матрицы и волокон, а также от длины и процента содержания последних.

Кодыш В.Э. разработал методику вероятностного оптимального проектирования строительных конструкций, в частности, балочных элементов покрытий одноэтажных зданий [9].

Изучением эффективного практического использования современных эвристических алгоритмов оптимизации для расчета строительных конструкций на примере результатов применения алгоритма поиска гармонии (HS) для подбора сечения железобетонной балки по наибольшему изгибающему моменту и с учетом минимальной стоимости материалов занимались М.А. Ильин и А.Г. Тамразян [10].

Сафронов В.С. и Нгуен Динь Хоа ставят и решают задачу оптимизации размеров и армирования изгибаемой железобетонной балки с позиций теории риска с учетом зависимости от вероятности разрушения конструкции [11].

Никлюкин А.Н. под руководством В.П. Ярцева разрабатывал расчетно-экспериментальные методы оценки напряженно-деформированного состояния и определения силы сцепления в зоне взаимодействия стеклопластиковой арматуры с бетоном при действии статической осевой выдергивающей силы [12].

Вопрос оптимизации арматуры сильно нагруженных железобетонных колонн со случайными эксцентриситетами изучал С.В. Прохоров [13].

Муймаров К. В. занимался разработкой алгоритмов оптимизации железобетонных плит по критерию минимальной сметной себестоимости на дискретных множествах структур армирования, классов материалов и геометрических параметров [14].

Скорук Л.Н. определял эффективные параметры армирования железобетонных конструкций [15].

Влияние характера поперечного армирования на величину раскрытия наклонных трещин в изгибаемых балках при длительном нагружении выяснял В.Г. Колбасин в статье [16].

Анализ разрушения бетонных и железобетонных балок с разными коэффициентами армирования провела Marta Słowik [17].

В [18] Н.В. Бакулин представляет методы оптимального проектирования и расчета строительных конструкций.

Бондаренко В.М. сформулировал и решил задачу оценки потерь энергии при знакопеременном силовом деформировании железобетона и изложил начала метода энергетической оптимизации железобетонных конструкций в работе [19].

В статье [20] В.М. Бондаренко формулирует оценки потерь энергии при знакопеременном деформировании железобетона. Предложен способ учета этих потерь при проектировании конструкций; способ учитывает случаи влияния коррозионных повреждений на указанные потери и содержит предложения по оптимизации при проектировании железобетонных конструкций.

Вопросами оптимизации железобетонных сооружений и конструкций по критерию надежности занимался А.И. Долганов [21].

Дмитриевой Т.Л. и Нгуен Ван Ты в [22] рассмотрена задача оптимального проектирования однопролетной статически определимой железобетонной балки прямоугольного сечения, формализованная в виде задачи нелинейного математического программирования.

В [23] С.Г. Гряно, Д.Р. Маиляном и Л.Д. Маиляном приводятся результаты внедрения железобетонных конструкций с переменным вдоль пролета комбинированным преднапряжением. Проводится выявление экономической эффективности от замены армирования и преднапряжения.

Волосович О.В. и Волосович О.И. занимались разработкой схемы алгоритма расчета железобетонных неразрезных равнопролетных балок в балочной клетке согласно современным нормам, на основании которого была составлена программа в Microsoft Excell [24].

Результаты эксперимента по определению несущей способности железобетонной балки прямоугольного сечения с симметричным армированием и сравнение с результатами расчетов, выполненными в соответствии с действующими нормативными документами, а также анализ результатов приведены А.А. Быковым и И.Л. Тонковым в [25].

Тесля В.А. разработал новую методику расчета монолитного ребристого железобетонного перекрытия, позволяющую принимать решения по выбору классов бетона и арматуры и определению расстояний по размещению второстепенных балок [26].

В [27] В.С. Бабалич, С.К. Гаевский и А.С. Жиденко приводят результаты анализа методов математического моделирования конструкции монолитного железобетонного часторебристого перекрытия. Ими рассматриваются как уже известные методы моделирования, так и инновационный метод, разработанный авторской группой Волгоградского Государственного технического университета. Кроме того, приводятся способы оптимизации часторебристых перекрытий, направленные на снижение материалоемкости и трудоемкости при возведении данного типа перекрытий. Авторы данной публикации предлагают свои рекомендации по расчету, проектированию и возведению часторебристых перекрытий.

Бойченко М.Б. Абакумов Р.Г в [28] рассматривают применение композитной арматуры для армирования железобетонных элементов с целью уменьшения стоимости и снижения веса перекрытий.

Филатов В.Б. и Жильцов Ю.В. проводили испытания железобетонных балок с поперечным армированием в виде хомутов, стальных пластин и без поперечного армирования [29]. На основе результатов испытания ими был выполнен сравнительный анализ опытных величин разрушающих нагрузок по наклонному сечению и теоретических значений, полученных по существующим методикам расчета. Авторами статьи также были представлены результаты экспериментальных исследований работы жесткой поперечной арматуры в наклонных сечениях изгибаемых элементов.

Статья Г.А. Смоляго с соавторами [30] посвящена исследованию дефектов, возникающих при бетонировании и армировании железобетонных стержневых элементов. Оценивается влияние связанного с этим занижения прочности бетона и



сокращения площади рабочей продольной арматуры на несущую способность железобетонных стержневых систем.

Не следует забывать и А.Ф. Лолейта с А.А. Гвоздевым [31, 32], в работах которых был предложен весьма плодотворный метод расчета изгибаемых железобетонных конструкций по предельным состояниям. Основные предпосылки этого метода можно сформулировать следующим образом: процент армирования конструкции не должен превышать предельных величин; бетон работает только на сжатие; равенство внешнего и внутреннего моментов соответствует этапу разрушения; разрушение железобетонного сечения происходит при достижении арматурой в растянутой зоне предела текучести, а бетоном в сжатой зоне – предела прочности; форма эпюры сжатой зоны оказывает малозначительное влияние на оценку несущей способности сечения.

В работе [33] авторов В.Ф. Степановой, А.В. Бучкина и Д.А. Ильина приводится информация по выполненным исследованиям композитной полимерной арматуры (АКП) в России и за рубежом. Названа действующая нормативная документация на АКП. Представлены основные характеристики волокон и связующих для изготовления АКП требуемого качества и отмечены её недостатки при использовании в конструкциях, работающих на растяжение при изгибе. Рассмотрены первоначальные характеристики фибробетона и намечены пути повышения трещиностойкости бетонных конструкций, армированных АКП и фиброй. Изготовлены и испытаны балки при кратковременной нагрузке.

В статье [34] Е.Н. Александрова и А.Д. Истомина представлены результаты анализа напряженно-деформированного состояния нормального сечения железобетонной балки и балки с комбинированным армированием на основе диаграмм работы бетона и сталефибробетона.

Плевков В.С. и Уткин Д.Г. в [35] представляют результаты теоретических и экспериментальных исследований изгибаемых и сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов при статическом и кратковременном динамическом нагружениях. Ими была получена действительная нелинейная диаграмма деформирования сталефибробетона и дано ее аналитическое описание при кратковременном динамическом нагружении. Проведены комплексные экспериментальные исследования работы сталефиброжелезобетонных конструкций при статическом и кратковременном динамическом нагружениях, получены новые научные данные. Разработаны методы расчета прочности и трещиностойкости таких элементов с учетом нелинейной работы бетона, арматуры и сталефибробетона. Разработано пособие, посвященное оценке технического состояния, восстановлению и усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений с применением фибробетона.

В статье [36] авторов В.С. Плевкова, А.Е. Карпова, Д.Г. Уткина представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований изгибаемых и сжато-изогнутых фиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении. Разработан метод расчета прочности таких элементов с учетом нелинейной работы бетона, арматуры и фибробетона. Разработано пособие, посвященное оценке технического состояния, восстановлению и усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений с применением фибробетона.

В [37] В.С. Изотов, Р.Х. Мухаметрахимов и Л.С. Сабитов рассматривают способ дисперсного армирования бетонных изгибаемых элементов путем введения фибры только в растянутую зону бетона, что приводит к более эффективному использованию и экономии дисперсной арматуры, снижению материалоемкости изделий при сохранении заданной прочности на изгиб, высокой ударной вязкости и трещиностойкости. Впервые дается сравнительная оценка эффективности дисперсного армирования двух видов металлических фибр при армировании растянутой зоны бетонных изгибаемых элементов.

Зулпуев А.М. с соавторами в [38] дают расчетную модель метода сосредоточенных деформаций для углеродофиброжелезобетонной балки с учетом нелинейной работы, применением полных диаграмм деформирования бетона и арматуры, физической и геометрической нелинейности.

Уткин Д.Г. разрабатывает, экспериментально проверяет и реализует метод расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры в сжатой или растянутой зонах при кратковременном динамическом нагружении с учетом нелинейной работы материалов [39].

В [40] А.И. Шеин и Я.А. Азимова приводят результаты решения задачи оптимизации количества арматурной фибры композита в виде задачи поиска минимальных совокупных долей фибры в армированных объемах композита. Решение задачи разбито на два этапа: 1) на основе предварительного расчета однородной конструкции (здания, сооружения) по изополям напряжений устанавливаются конечные элементы композита, требующие армирования; 2) с помощью математического пакета Maple выполняется решение задачи оптимизации количества фибры. Задача оптимизации может также решаться приближенно путем сравнения вариантов.

Уткин В.С. в статье [41] рассматривает проблему оптимизации армирования сжатых областей железобетонных элементов. Предлагает в порядке обсуждения рассмотреть предложения более рационального армирования железобетонных колонн и балок.

Авторами статьи [42] С.Ю. Гридневым и И.Г. Овчинниковым на примере балки-стенки, изготовленной из сталефибробетона, найдено такое распределение плотности армирования, которое обеспечивает минимальный расход арматуры при выполнении прочностных ограничений при заданных условиях нагружения. Разработан метод решения задачи оптимального проектирования конструкций путем управления законом распределения неоднородности механических свойств по объему. Решена задача нахождения оптимального распределения упругих свойств неоднородного изотропного материала, который является моделью композитного материала с хаотическим армированием. На первом этапе определено напряженное состояние конструкции с известными свойствами материала. На втором этапе на основе результатов первого этапа найдено распределение плотности армирования, обеспечивающее минимальный расход арматуры. Показано, что задача является многоэкстремальной, и указанным способом можно найти лишь локальный минимум функции цели. В ходе оптимизации активными являлись ограничения по прочности на разрыв и по допустимым значениям плотностей армирования.

Меньщикова Н.С. Коваленко Г.В. проводят численный эксперимент по оценке напряженно-деформированного состояния железобетонных балок со смешанным армированием и анализируют его результаты [43].

В статье [44] авторов А.М. Зулпуева, К. Темикеева и М. Шайдилдаева даются расчеты для углеродофиброжелезобетонной балки с учетом нелинейной работы, применением полных диаграмм деформирования бетона и арматуры, физической и геометрической нелинейности.

Белоусовым И.В. и соавторами в [45] рассматривается область применения фибробетонов, выявляется преимущество использования фибробетонов по сравнению с обычным бетоном. Проводится анализ эффективности использования фибробетонов.

Залесовым А.С. и Пащаниным А.А. рассмотрены методики расчета железобетонных балок на действие поперечных сил по СП, EN, ACI. Выполнен сравнительный анализ данных методик и рассмотрены их недостатки в сравнении с универсальной методикой расчета балок с использованием объемных конечных элементов. Предлагается уточнение методики СП в части ограничения несущей способности балок при малых пролетах среза [46].

В статье [47] Д.С. Ванус приводит результаты экспериментальных исследований железобетонных балок с косвенным сетчатым армированием сжатой зоны, подтверждающие, что это конструктивное решение может быть использовано для повышения жесткости и трещиностойкости изгибаемых балочных элементов и их несущей способности.

Дудиной И.В. и Меньщиковой Н.С. рассмотрена нелинейно-деформационная модель напряженно-деформированного состояния конструкций со смешанным армированием. Проанализированы результаты компьютерного моделирования железобетонных балок с различными схемами совмещенного армирования. Сделаны выводы о

влиянии коэффициента частичного преднапряжения на характеристики жесткости балок покрытия со смешанным армированием [48].

В статье [49] Е.Г. Абашина рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению площади поперечного сечения продольной рабочей арматуры в железобетонных балках с использованием статического и динамического методов. Установлено, что площадь рабочей арматуры функционально связана с максимальным прогибом и основной (или первой резонансной) частотой колебаний балок, поэтому максимальный прогиб и основная частота колебаний могут использоваться в качестве критериев для оценки площади арматуры.

**Выводы.** Нами разобраны существующие подходы к оптимизации стержневого и распределенного (фибрового) армирования балочных систем.

Все приведенные выше работы являются важными и полезными, особенно при изучении вопроса рационального проектирования систем перекрестных балок. Однако вопрос оптимизации армирования остается малоизученным и интересным для дальнейших исследований. Здесь выявлены актуальные проблемы, связанные с оптимизацией балочных систем как перекрестных композитных систем.

### Список литературы

1. Справочник по строительной механике корабля: в 3 т. Т. 1. Общие понятия. Стержни. Стержневые системы и перекрытия / Г.В. Бойцов, О.М. Палий, В.А. Постнов, В.С. Чувиковский. – Л.: Судостроение, 1982. – 376 с.
2. Игнатюк, В.И. Автоматизированная система статического расчета систем перекрестных / В.И. Игнатюк, Т.Ю. Алексеев // Вестник Брестского Государственного технического. Физика, математика, информатика. – 2015. – № 5 (95). – С. 48–54.
3. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на квадратном плане с учетом податливости узловых соединений / А.В. Турков, А.А. Макаров // Строительство и реконструкция. – 2013. – №1. – С. 33–36.
4. Викулов, М.А. Развитие метода предельного равновесия для перекрестных систем из жестко-пластичного материала: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.А. Викулов. – Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2013.
5. Меньшикова, Н.С. Анализ результатов численного эксперимента по оценке напряженно-деформированного состояния железобетонных балок со смешанным армированием / Н.С. Меньшикова, Г.В. Коваленко // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – № 5. – С. 85–86.
6. Дау, Тьеколо. Влияние продольного армирования на несущую способность наклонных сечений железобетонных балок: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Дау Тьеколо. – М.: Рос. ун-т дружбы народов, 1998.
7. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок на квадратном плане с размером ячеек 0,4x0,4 м с покрытием при различных схемах опирания на динамические и статические нагрузки / А.В. Турков, А.А. Макаров, О.А. Ветрова // Строительство и реконструкция. – 2017. – № 1 (69). – С. 82–89.
8. Винюкова, И.Н. Оптимизация структуры балки с использованием дисперсного армирования / И.Н. Винюкова, И.В. Ходькина // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова.– Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 3127–3131.
9. Кодыш, В.Э. Вероятностная оптимизация строительных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Э. Кодыш; ордена Трудового Красного Знамени Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт комплексных проблем строительных конструкций и сооружений им. В. А. Кучеренко Госстроя России. – М., 1993.
10. Ильин, М.А. Применение методов эвристической оптимизации при подборе сечений железобетонных балок / М.А. Ильин, А.Г. Тамразян // Молодежные инно-

вазии: сборник материалов семинара молодых учёных XXII Международной научной конференции. – 2019. – С. 316–321.

11. Сафронов, В.С. Оптимизация изгибаемых железобетонных балок по параметру риска / В.С. Сафронов, Нгуен Динь Хоа // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной конференции. Воронежский государственный университет. – 2010. – С. 329–333.

12. Никлюкин, А.Н. Моделирование совместной работы арматуры с бетоном на примере композитной балки: дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Никлюкин. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020.

13. Прохоров, С.В. Оптимизация арматуры сильно нагруженных железобетонных колонн со случайными эксцентриситетами / С.В. Прохоров // Теория инженерных сооружений и строительные конструкции. – 2008. – №1 (9). – С. 100–101.

14. Муймаров, К.В. Оптимизация плит с выбором структур армирования: дис. ... канд. техн. наук / К.В. Муймаров. – Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2019.

15. Скорук, Л.Н. Определение эффективных параметров армирования железобетонных конструкций / Л.Н. Скорук // САПР и графика. – 2017. – №7.

16. Колбасин, В.Г. Влияние характера поперечного армирования на величину раскрытия наклонных трещин в изгибаемых балках при длительном нагружении / В.Г. Колбасин // Исследования по бетону и железобетону: сб. научн. тр. № 46. – Челябинск, 1967. – С. 85–104.

17. Słowik, Marta. The analysis of failure in concrete and reinforced concrete beams with different reinforcement ratio / Marta Słowik // Archive of Applied Mechanics. – 2019. – Vol. 89. – P. 885–895.

18. Бакулин, В.Н. Методы оптимального проектирования и расчета композиционных конструкций: в 2 т. Т. 1. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов / В.Н. Бакулин, Е.Л. Гусев, В.Г. Марков. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2008. – 256 с.

19. Бондаренко, В.М. Посылки энергетической оптимизации железобетонных конструкций, воспринимающих знакопеременные нагрузки / В.М. Бондаренко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2015. – № 4. – С. 24–31.

20. Бондаренко, В.М. Вопросы энергетической оптимизации железобетонных конструкций при динамическом нагружении / В.М. Бондаренко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2015. – № 5. – С. 34–38.

21. Долганов, А.И. Оптимизация железобетонных сооружений и конструкций по критерию надежности: дис. ... д.-ра. техн. наук: 05.23.01 / Долганов Андрей Иванович; Северный международный ун-т г. Магадана. – М., 2000. – 436 с.

22. Дмитриева, Т.Л. Математические модели в задаче оптимального проектирования железобетонной балки прямоугольного сечения / Т.Л. Дмитриева, Нгуен Ван Ты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – №2(42).

23. Гряно, С.Г. Повышение эффективности железобетонных балок за счет использования переменного преднапряжения / С.Г. Гряно, Д.Р. Маилян, Л.Д. Маилян // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 47, №4 (47).

24. Волосович, О.В. Алгоритмизация расчета железобетонной неразрезной балки / О.В. Волосович, О.И. Волосович // Строительство и техногенная безопасность. – 2012. – №43.

25. Быков, А.А. Расчет железобетонных балок прямоугольного сечения с симметричным армированием на чистый изгиб / А.А. Быков, И.Л. Тонков // Construction and Geotechnics. – 2010. – №1.

26. Тесля, В.А. Ребристые железобетонные монолитные перекрытия / В.А. Тесля // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – №6.

27. Бабалич, В.С. Способы оптимизации конструкции часторебристых перекрытий / В.С. Бабалич, С.К. Гаевский, А.С. Жиденко // Вестник науки и образования. – 2017. – №4(28).

28. Бойченко, М.Б. Армирование железобетонных элементов с применением композитной арматуры с целью уменьшения стоимости и снижения веса / М.Б. Бойченко, Р.Г. Абакумов // *Инновационная наука*. – 2017. – №4–3.
29. Филатов, В.Б. Особенности работы и эффективное использование жесткой поперечной арматуры железобетонных балок / В.Б. Филатов, Ю.В. Жильцов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2012. – Т. 14, №4–5.
30. Смоляго, Г.А. Расчет многопролетных железобетонных балок по методу заданных деформаций / Г.А. Смоляго, А.Е. Жданов, С.В. Дрокин, А.В. Дронов // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2014. – № 12. – С. 59–61.
31. Гвоздев, А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А.А. Гвоздев. – М.: Стройиздат, 1949. – 280 с.
32. Гвоздев, А.А. Метод предельного равновесия в применении к расчету железобетонных конструкций / А.А. Гвоздев // *Инженерный сборник*. – 1949. – Т. 5. – С. 3–20.
33. Степанова, В.Ф. Исследование особенности работы бетонных конструкций с комбинированным армированием (арматурой композитной полимерной и металлической фиброй) / В.Ф. Степанова, А.В. Бучкин, Д.А. Ильин // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2017. – №1.
34. Александров, Е.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с комбинированным армированием на основе диаграмм деформирования фибробетона / Е.Н. Александров, А.Д. Истомин // *Научное обозрение*. – 2016. – № 4. – С. 35–39.
35. Плевков, В.С. Прочность железобетонных элементов с армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, Д.Г. Уткин // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. – 2014. – № 5. – С. 38–44.
36. Плевков, В.С. Прочность и деформативность железобетонных элементов с зонным фибровым армированием при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, А.Е. Карпов, Д.Г. Уткин // *Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия* / под ред. А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. – 2016. – С. 342–348.
37. Изотов, В.С. Экспериментальные исследования эффективности дисперсного армирования растянутой зоны бетонных изгибаемых элементов / В.С. Изотов, Р.Х. Мухаметрахимов, Л.С. Сабитов // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. – 2010. – № 1 (17). – С. 119–125.
38. Зулпуев, А.М. Работа железобетонных конструкций с фибровым армированием / А.М. Зулпуев, К. Темикеев, А.М. Ганыев, С.А. Асанова, И.Р. Турсунов // *Устойчивое развитие науки и образования*. – 2018. – № 1. – С. 188–194.
39. Уткин, Д.Г. Совершенствование метода расчета прочности сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении: автореф. дис. ... кандидата технических наук / Д.Г. Уткин. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2009.
40. Шеин, А.И. Оптимизация массы фибры фибробетонных конструкций / А.И. Шеин, Я.А. Азимова // *Моделирование и механика конструкций*. – 2020. – № 11. – С. 88–97.
41. Уткин, В.С. Оптимизация армирования несущих железобетонных конструкций в сжатой зоне / В.С. Уткин // *Технологии бетонов*. – 2014. – № 5 (94). – С. 52–53.
42. Гриднев, С.Ю. Оптимальное проектирование балки-стенки из дисперсно-армированного материала / С.Ю. Гриднев, И.Г. Овчинников // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2017. – № 5 (371). – С. 219–225.
43. Меньщикова, Н.С. Анализ результатов численного эксперимента по оценке напряженно-деформированного состояния железобетонных балок со смешанным

армированием / Н.С. Меньщикова, Г.В. Коваленко // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – № 5. – С. 85–86.

44. Зулпуев, А.М. Экспериментально-теоретические исследования предельных состояний изгибаемого элемента с зонным армированием из углеродной фибры / А.М. Зулпуев, К. Темикеев, М. Шайдилдаев // Территория науки. – 2017. – №6.

45. Белоусов, И.В. Применение фибробетона в железобетонных конструкциях / И.В. Белоусов, А.В. Шилов, З.А. Меретуков, Л.Д. Маилян // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 47, №4 (47).

46. Залесов, А.С. Расчет прочности железобетонных балок с использованием объемных конечных элементов в развитие норм по проектированию железобетонных балок / А.С. Залесов, А.А. Пащанин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 4 (237). – С. 66–71.

47. Ванус, Д.С. Экспериментальные исследования железобетонных балок с косвенным сетчатым армированием сжатой зоны / Д.С. Ванус // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 5. – С. 56–57.

48. Дудина, И.В. Основные положения нелинейно-деформационной модели напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с косвенным армированием / И.В. Дудина, Н.С. Меньщикова // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 1 (1). – С. 90–94.

49. Абашин, Е.Г. Определение площади поперечного сечения рабочей арматуры при контроле железобетонных балок статическим и динамическим методами / Е.Г. Абашин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 1 (291). – С. 128–131.

50. Коробко, В.И. Об одной «замечательной» закономерности в теории упругих пластинок / В.И. Коробко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – №11. – С. 32–36.

#### Reference

1. Handbook of ship construction mechanics: in 3 vol. Vol. 1. General concepts. Bars. Bar systems and slbs / G.V. Boitsov, O.M. Paliy, V.A. Postnov, V.S. Chuvikovskiy. – L.: Shipbuilding, 1982. – 376 p.

2. Ignatyuk, V.I. Computerized system of static calculation of the cross-beam systems / V.I. Ignatyuk, T.J. Alekseev // Vestnik of Brest State Technical University. Physics, mathematics, computer science. – 2015. – No. 5 (95). – P. 48–54.

3. Turkov, A.V. Deflections and frequencies of own fluctuations of systems cross beams with different sizes of cells on the square plan taking into account pliability of nodal connections / A.V. Turkov, A.A. Makarov // Construction and reconstruction. – 2013. – №1. – P. 33–36.

4. Vikulov, M.A. Development of the limit equilibrium method for cross systems made of rigid-plastic material: Abstract of the dis. ... of Candidate of Sciences / M.A. Vikulov. – Voronezh: Voronezh State Technical University, 2013.

5. Menshikova, N.S. Analysis of the results of a numerical experiment to assess the stress-strain state of reinforced concrete beams with mixed reinforcement / N.S. Menshikova, G.V. Kovalenko // Modern high-tech technologies. – 2008. – No. 5. – P. 85–86.

6. Dau Tiekolo. Influence of longitudinal reinforcement on the bearing capacity of inclined sections of reinforced concrete beams: abstract of the dis. ... of Candidate of Sciences / Dau Tiekolo. – M.: RUDN university, 1998.

7. Turkov, A.V. Pilot studies of systems of cross beams on the square plan with a size of cells of 0,4x0,4 m the covering at various schemes supporting on dynamic and static loadings / A.V. Turkov, A.A. Makarov, O.A. Vetrova // Construction and reconstruction. – 2017. – No. 1 (69). – P. 82–89.

8. Vinnikova, I.N. Optimization of the beam structure using dispersed reinforcement / I.N. Vinnikova, I.V. Khodykina // International scientific and technical conference of young

scientists of BSTU named after V. G. Shukhov. – Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2016. – P. 3127–3131.

9. Kodysh, V.E. Probabilistic optimization of building structures: abstract of the dis. ... of Candidate of Sciences / V.E. Kodysh; Order of the Red Banner of Labor Central Research and Design-Experimental Institute of Complex problems of building structures and structures named after V. A. Kucherenko Gosstroy of Russia. – M., 1993.

10. Ilyin, M.A. Application of methods of heuristic optimization in the selection of sections of reinforced concrete beams / M.A. Ilyin, A.G. Tamrazyan // Youth innovations Collection of materials of the seminar of young scientists of the XXII International Scientific Conference. – 2019. – P. 316–321.

11. Safronov, V.S. Nguyen Dinh Hoa Optimization of bent reinforced concrete beams by the risk parameter / V.S. Safronov // Actual Problems of Applied Mathematics, Computer Science and Mechanics Proceedings of the International Conference. – Voronezh: Voronezh State University, 2010. – P. 329–333.

12. Nikolyukin, A.N. Modeling of joint work of reinforcement with concrete on the example of a composite beam: dis. ... of Candidate of Sciences / A.N. Nikolyukin. – Tambov: Tambov State Technical University, 2020.

13. Prokhorov, S.V. Optimization of reinforcement of heavily loaded reinforced concrete columns with random eccentricities / S.V. Prokhorov // Theory of engineering structures and building structures KSUAE. – 2008. – No. 1 (9). – P. 100–101.

14. Muimarov, K.V. Optimization of plates with the choice of reinforcement structures: dis. ... of Candidate of Sciences / K.V. Muimarov. – Bryansk: Bryansk State Engineering and Technological University, 2019.

15. Skoruk, L.N. Determination of effective parameters of reinforced concrete structures reinforcement / L.N. Skoruk // CAD and graphics. – 2017. – No. 7.

16. Kolbasin, V.G. Influence of the character of transverse reinforcement on the size of the opening of inclined cracks in bent beams during long loading / V.G. Kolbasin // Research on concrete and reinforced concrete. – 1967. – No. 46. – P. 85–104.

17. Słowik, Marta. The analysis of failure in concrete and reinforced concrete beams with different reinforcement ratio / Marta Słowik // Archive of Applied Mechanics. – 2019. – Vol. 89. – P. 885–895.

18. Bakulin V.N. Methods of optimal design and calculation of composite structures: in 2 vols. Vol.1. Optimal design of structures made of composite and traditional materials / V.N. Bakulin, E.L. Gusev, V.G. Markov. – M.: FIZMALIT, 2008. – 256 p.

19. Bondarenko, V.M. Premises of energy optimization of reinforced concrete structures that perceive alternating loads / V.M. Bondarenko // Construction mechanics of engineering structures and structures. – 2015. – No. 4. – P. 24–31.

20. Bondarenko, V.M. Questions of energy optimization of reinforced concrete structures under dynamic loading / V.M. Bondarenko // Construction mechanics of engineering structures and structures. – 2015. – No. 5. – P. 34–38.

21. Dolganov, A.I. Optimization of reinforced concrete structures and structures according to the reliability criterion: dis. ... of Doctor of Sciences: 05.23.01 / Dolganov Andrey Ivanovich; Northern International University of Magadan. – M., 2000. – 436 p.

22. Dmitrieva, T.L. Mathematical models in the optimal design of reinforced concrete rectangular beam / T.L. Dmitrieva, Nguyen Van Tu // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2014. – No. 2 (42).

23. Girenko, S.G. Increasing the efficiency of reinforced concrete beams due to the use of variable prestressing / S.G. Girenko, D.R. Mailyan, L.D. Mailyan // Engineering Bulletin of the Don. – 2017. – Vol. 47, No. 4 (47).

24. Volosovich, O.V. Algorithmization of calculation of reinforced concrete continuous beam / O.V. Volosovich, O.I. Volosevich // Construction and technogenic safety. – 2012. – No. 43.

25. Bykov, A.A. Calculation of reinforced concrete beams of rectangular cross-section with symmetric reinforcement for pure bending / A.A. Bykov, I.L. Tonkov // Construction and Geotechnics. – 2010. – No. 1.

26. Teslya, V.A. Ribbed reinforced concrete monolithic floors / V.A. Teslya // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2010. – No. 6.
27. Babalich, V.S. Ways to optimize the construction of often-ribbed overlappings / V.S. Babalich, S.K. Gaevsky, A.S. Zhidenko // Bulletin of Science and Education. – 2017. – No. 4 (28).
28. Boychenko, M.B. Reinforcement of reinforced concrete elements with the use of composite reinforcement in order to reduce the cost and reduce the weight / M.B. Boychenko, R.G. Abakumov // Innovative Science. – 2017. – No. 4–3.
29. Filatov, V.B. Features of work and effective use of the rigid cross fittings in ferroconcrete beams / V.B. Filatov, Yu.V. Zhiltsov // News Samara scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – Vol. 14, №4–5.
30. Smolyago, G.A. Calculation of multi-span reinforced concrete beams by the method of given deformations / G.A. Smolyago, A.E. Zhdanov, S.V. Drokin, A.V. Dronov // Industrial and civil construction. – 2014. – No. 12. – P. 59–61.
31. Gvozdev A.A. Calculation of the bearing capacity of structures by the method of limiting equilibrium / A.A. Gvozdev. – M.: Stroyizdat, 1949. – 280 p.
32. Gvozdev, A.A. The method of limiting equilibrium in application to the calculation of reinforced concrete structures / A.A. Gvozdev // Engineering collection. – 1949. – Vol. 5. – P. 3–20.
33. Stepanova, V.F. Investigation of the features of the work of concrete structures with combined reinforcement (reinforcement of composite polymer and non-metallic fiber) / V.F. Stepanova, A.V. Buchkin, D.A. Ilyin // Academia. Architecture and Construction. – 2017. – No. 1
34. Alexandrov E.N. Istomin A.D. Analysis of stress-strain state of flexible elements with combined reinforcement on the basis of fibrous concrete strain diagrams / E.N. Alexandrov, A.D. Istomin // Scientific review. – 2016. – No. 4. – P. 35–39.
35. Plevkov, V.S. Strength of reinforced concrete elements with steel fiber reinforcement under short-term dynamic loading / V.S. Plevkov, D.G. Utkin // Earthquake-resistant construction. Safety of structures. – 2014. – No. 5. – P. 38–44.
36. Plevkov, V.S. Strength and deformability of reinforced concrete elements with zone fiber reinforcement under short-term dynamic loading / V.S. Plevkov, A.E. Karpov, D.G. Utkin // Modern problems of calculation of reinforced concrete structures, buildings and structures for emergency impacts / Edited by A.G. Tamrazyan, D.G. Kopanitsa. – 2016. – P. 342–348.
37. Izotov, V.S. Experimental studies of the effectiveness of dispersed reinforcement of the stretched zone of concrete bent elements / V.S. Izotov, R.H. Mukhametrakhimov, L.S. Sabitov // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture. – 2010. – No. 1 (17). – P. 119–125.
38. Zulpuyev, A.M. Work of reinforced concrete structures with fiber reinforcement / A.M. Zulpuyev, K. Temikeev, A.M. Ganiev, S.A. Asanova, I.R. Tursunov. // Sustainable development of science and education. – 2018. – No. 1. – P. 188–194.
39. Utkin, D.G. Improvement of the method for calculating the strength of compressed-curved reinforced concrete elements with zone reinforcement made of steel fiber under short-term dynamic loading: Abstract of the dis. ... of Candidate of Sciences / D.G. Utkin. – Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2009.
40. Shein, A.I. Optimization of the mass of fibers fiber-reinforced concrete structures / A.I. Shein, Ya.A. Asimova // Modeling and mechanics of structures. – 2020. – No. 11. – P. 88–97.
41. Utkin, V.S. Optimization of reinforcement of load-bearing reinforced concrete structures in the compressed zone / V.S. Utkin // Concrete technologies. – 2014. – No. 5 (94). – P. 52–53.
42. Gridnev, S.Yu. Optimal design of a beam-wall made of dispersed-reinforced material / S.Yu. Gridnev, I.G. Ovchinnikov // News of higher educational institutions. Technology of the textile industry. – 2017. – No. 5 (371). – P. 219–225.



43. Menschikova, N.S. Analysis of the results of a numerical experiment to assess the stress-strain state of reinforced concrete beams with mixed reinforcement / N.S. Menschikova, G.V. Kovalenko // *Modern high-tech technologies*. – 2008. – No. 5. – P. 85–86.
44. Zulpuyev, A.M. Experimental and theoretical studies of the limit states of a bent element with zone reinforcement made of carbon fiber / A.M. Zulpuyev, K. Temikeev, M. Shaidildaev // *Territory of Science*. – 2017. – No. 6.
45. Belousov, I.V. Application of fiber concrete in reinforced concrete structures / I.V. Belousov, A.V. Shilov, Z.A. Meretukov, L.D. Mailyan // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2017. – Vol. 47, No. 4 (47).
46. Zalesov, A.S. Calculation of the strength of reinforced concrete beams using volumetric finite elements in the development of norms for the design of reinforced concrete beams / A.S. Zalesov, A.A. Pashanin // *Construction mechanics and calculation of structures*. – 2011. – No. 4 (237). – P. 66–71.
47. Vanus, D.S. Experimental studies of reinforced concrete beams with indirect mesh reinforcement of the compressed zone / D.S. Vanus // *Industrial and civil construction*. – 2011. – No. 5. – P. 56–57.
48. Dudina, I.V. The main provisions of the nonlinear deformation model of the stress-strain state of reinforced concrete beams with indirect reinforcement / I.V. Dudina, N.S. Menschikova // *Systems. Methods. Technology*. – 2009. – No. 1 (1). – P. 90–94.
49. Abashin, E.G. Determination of the cross-sectional area of the working armature in the control of reinforced concrete beams by static and dynamic methods / E.G. Abashin // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – 2012. – No. 1 (291). – P. 128–131.
50. Korobko, V.I. On one «remarkable» regularity in the theory of elastic plates / V.I. Korobko // *Construction and architecture*. – 1989. – No. 11. – P. 32–36.

УДК 624.04 + 539.3 + 534.17

*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**Чуманов Александр Васильевич**,  
аспирант кафедры «Механика»**Шеин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Механика»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru**Монахов Владимир Андреевич**,  
доктор технических наук, профессор  
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**Chumanov Aleksander Vasilyevich**,  
Postgraduate student of the department  
«Mechanics»**Shein Aleksander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Mechanics»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru**Monakhov Vladimir Andreevich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Mechanics»

## ЛЕНТОЧНАЯ СИСТЕМА ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ КУПОЛОВ

А.В. Чуманов, А.И. Шеин, В.А. Монахов

Приведены исследования по гашению колебаний закрытых куполов при сейсмическом воздействии. Для обеспечения эффекта гашения использована новая ленточная система. Эффект гашения достигается односторонними связями ленточных систем. Проведен динамический анализ колебаний купола. Для всесторонней оценки системы гашения проведены численные эксперименты с различными расположениями ленточного гасителя колебаний и определением наиболее рационального варианта ленточной системы для различных конфигураций куполов. Показано, что ленточные гасители являются эффективным средством гашения колебаний.

*Ключевые слова:* купол, колебания, демпфирование по Релею, гашение колебаний, ленточная система гашения колебаний

## BELT VIBRATION DAMPING SYSTEM FOR CLOSED DOMES

A.V. Chumanov, A.I. Shein, V.A. Monakhov

The article is devoted to the study of the problem of damping vibrations of closed domes under seismic influence. A new tape system was used to ensure the quenching effect. The quenching effect is provided by one-way connections of tape systems. A dynamic analysis of the dome vibrations has been carried out. For a comprehensive evaluation of the damping system, numerical experiments have been carried out with different locations of the vibration dampener and the determination of the most rational version of the tape system for different configurations of domes.

*Keywords:* dome, vibrations, Relay damping, vibration damping, belt vibration damping system

**Введение.** Купольные здания и сооружения распространены по всему миру. Примерами большепролетных куполов являются музей экологии биосферы (Монреаль, Канада), Глобал Арена в Швеции, Купол тысячелетия в Великобритании, библиотека Чикагского университета, штаб-квартира компании Amazon в Сиэтле, США и т.д. К тому же, в последнее время появилась тенденция развития купольного домостроения для индивидуального жилья по всей территории России.

Для безопасной эксплуатации таких видов зданий в сейсмически опасных регионах необходимо иметь возможность предотвращать развитие колебаний, т.е. нужна эффективная система гашения колебаний купольных сооружений. Анализом колебаний купола в виде стержневой механической системы под действием вертикально направленной сейсмической нагрузки занимались De-Min Wei и Sheng-fu Gao [1]. В работе [2]

Francesco Tornabene и Erasmo Viola приведены результаты анализа собственных форм колебаний купола в виде оболочки, образованной пластинчатыми конечными элементами. В работах [3, 4] предложена и численно испытана для открытых куполов ленточная система гашения колебаний. Рассмотрим использование данной системы гашения для куполов закрытого типа.

#### **Исследуемая конструкция**

Для динамического временного анализа колебаний рассматривался купол в виде циклически симметричной конструкции, составленной из жестко закрепленных между собой стальных стержневых элементов (рис. 1). Купол разделен на 16 сегментов в плане и пятью 16-угольными кольцами по высоте купола. Общее количество элементов – 176. Диаметр купола – 30 метров, крепление к основанию купола по его контуру – жесткое. Поперечное сечение элементов купола квадратное трубчатое 120×120 мм с толщиной стенки 4 мм.

#### **Используемые методы расчета**

Расчет конструкции производился методом конечных элементов. Уравнение движения механической системы:

$$M \cdot \ddot{U} + C \cdot \dot{U} + K \cdot U = P, \quad (1)$$

где  $M$  – диагональная матрица масс;  $U$  – неизвестный вектор перемещений узлов механической системы;  $C$  – матрица демпфирования;  $K$  – матрица жесткости всей системы;  $P$  – вектор нагрузок, элементы которых принимают значения, зависящие от вида сейсмического нагружения.

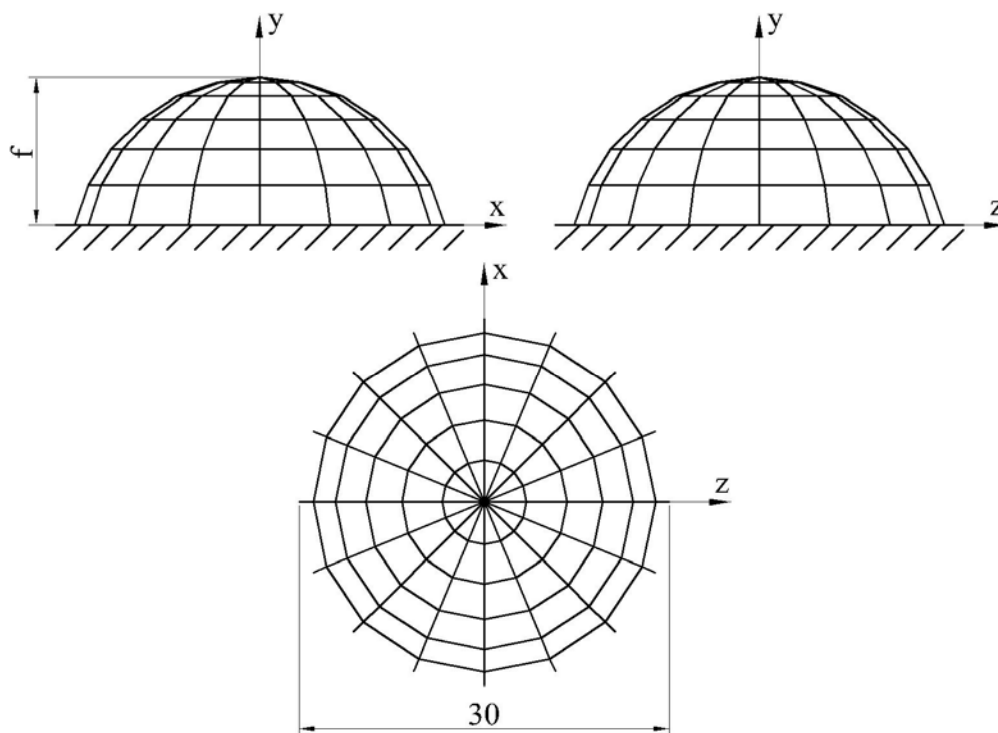


Рис. 1. Конечно-элементная модель купола

Для составления матрицы сопротивления движению  $C$  использовалось демпфирование по Релею:

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K, \quad (2)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты демпфирования, значения которых определяются из модального анализа конструкции [5].

Для определения коэффициентов демпфирования строительных сооружений, жёсткость которых при проектировании закладывается достаточно высокой, необходимо определить две низшие частоты собственных колебаний и решить систему из двух уравнений [5]:

$$\begin{cases} 2 \cdot \zeta_1 \cdot \omega_1 = \alpha + \beta \cdot (\omega_1)^2 \\ 2 \cdot \zeta_2 \cdot \omega_2 = \alpha + \beta \cdot (\omega_2)^2 \end{cases} \quad (3)$$

где  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  – эмпирические коэффициенты демпфирования для конструкции при первой и второй модах колебаний соответственно, для стержневых стальных конструкций  $\zeta_1 = \zeta_2 = 0,03$ ;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – частоты собственных колебаний, соответствующие первой и второй модам колебаний соответственно.

Для составления вектора узловых нагрузок  $P$  использовалась объёмная акселерограмма землетрясения в г. Газли (Узбекистан) в 1976 г. (рис. 2).

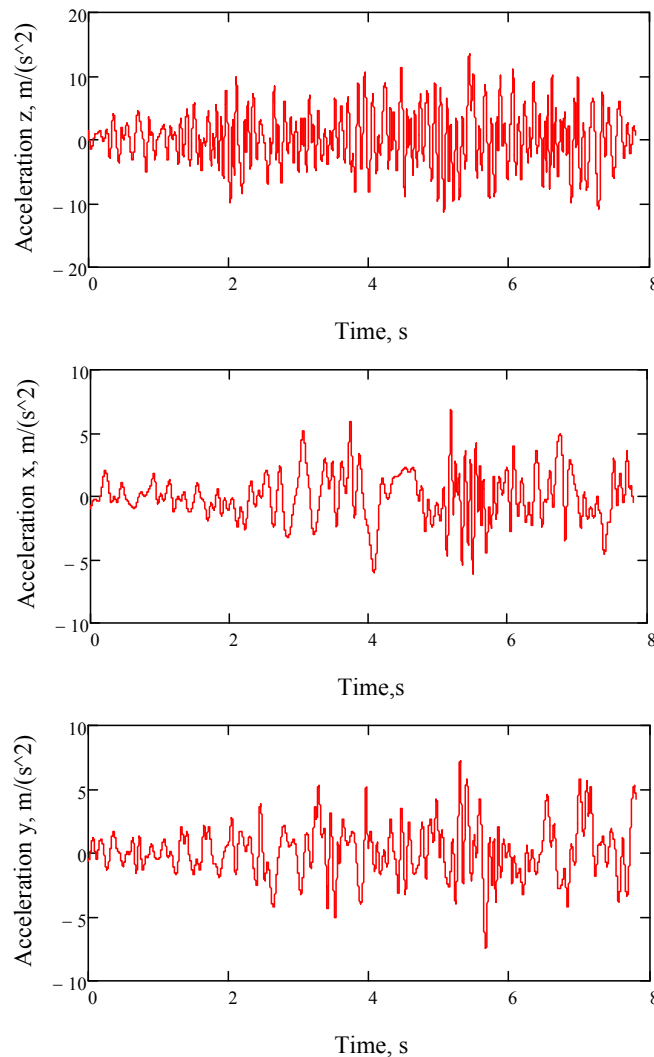


Рис. 2. 3D-акселерограмма землетрясения в г. Газли (Узбекистан)

При проведении численного эксперимента использовался метод центральных разностей. При этом вектор перемещений в следующий момент времени определялся по формуле

$$U_{t+\Delta t} = \left( \frac{M}{\Delta t} + \frac{C}{2} \right)^{-1} \cdot \left( (P_t - K \cdot U_t) \cdot \Delta t + M \cdot \frac{2 \cdot U_t - U_{t-\Delta t}}{\Delta t} + C \cdot \frac{U_{t-\Delta t}}{2} \right), \quad (4)$$

где  $U_{t+\Delta t}$ ,  $U_t$ ,  $U_{t-\Delta t}$  – векторы перемещений в следующий, текущий и прошлый момент времени;  $\Delta t$  – шаг времени.

**Результаты расчета**

В течение всего периода действия сейсмической нагрузки наблюдается изгибная форма колебаний механической системы (рис. 3).

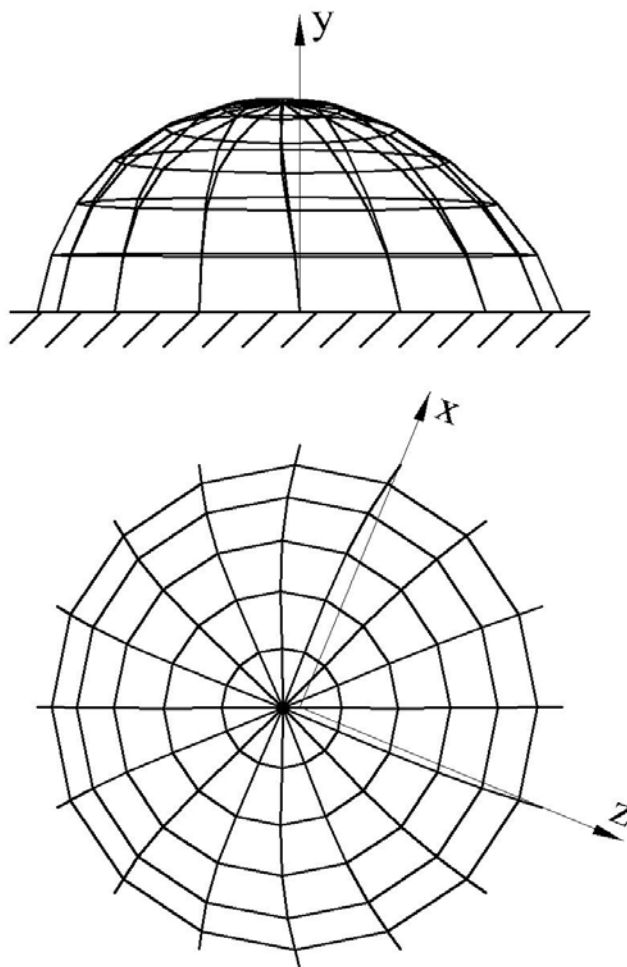


Рис. 3. Форма колебаний купола при сейсмическом воздействии (масштаб перемещений 5:1)

Рассмотрим перемещение верхнего узла купола с отношением  $f/L = 0,4$  (рис. 4). До момента времени 3 секунды амплитуда колебаний полюса купола вдоль оси  $x$  не превышает 4 см. В течение следующих 2 секунд (в интервале от 3 до 5 с) наблюдается увеличение величины амплитуды до 15 см. На заключительном отрезке времени величина амплитуды достигает максимального значения – 17,2 см (в момент времени 7,29 с). Характерным для всех видов куполов является колебание полюса купола вдоль оси  $y$ : на протяжении всего времени амплитуда колебаний не превышает 1 мм. В перемещении полюса вдоль оси  $z$  наблюдаются значения амплитуд в 2 см с тремя всплесками (4,8 см в момент времени 2,77 с; 5,7 см в моменты времени 5,94 с; 8,8 см в момент времени 7,31 с и 7,7 с).

Установим ленточную систему гашения колебаний, основанную на принципе, описанном в работах [3, 4]. Примем поперечное сечение ленты  $200 \times 4$  мм, модуль упругости ленты  $E = 3 \cdot 10^{10}$  Па. Для того чтобы определить наиболее рациональное расположение, предлагаем три варианта установки гасителя (рис. 5). Первый вариант установки для сравнения был выбран такой же, как и для расчета открытых куполов [3]. Выбор двух других вариантов основан на следующем принципе: одну из точек крепления необходимо установить в опорном узле стержня, а вторая точка крепления определяется по принципу максимального отклонения узлов от начального положения после динамического анализа перемещений узлов системы.

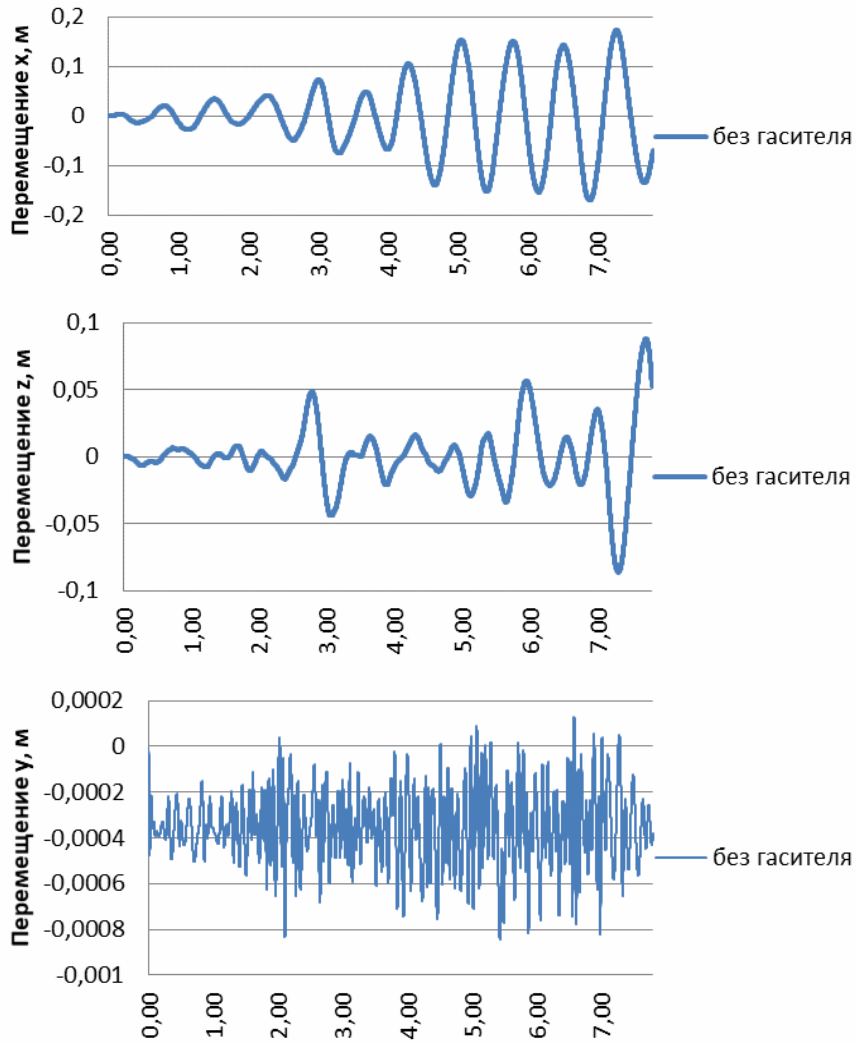


Рис. 4. Графики перемещений полюса купола

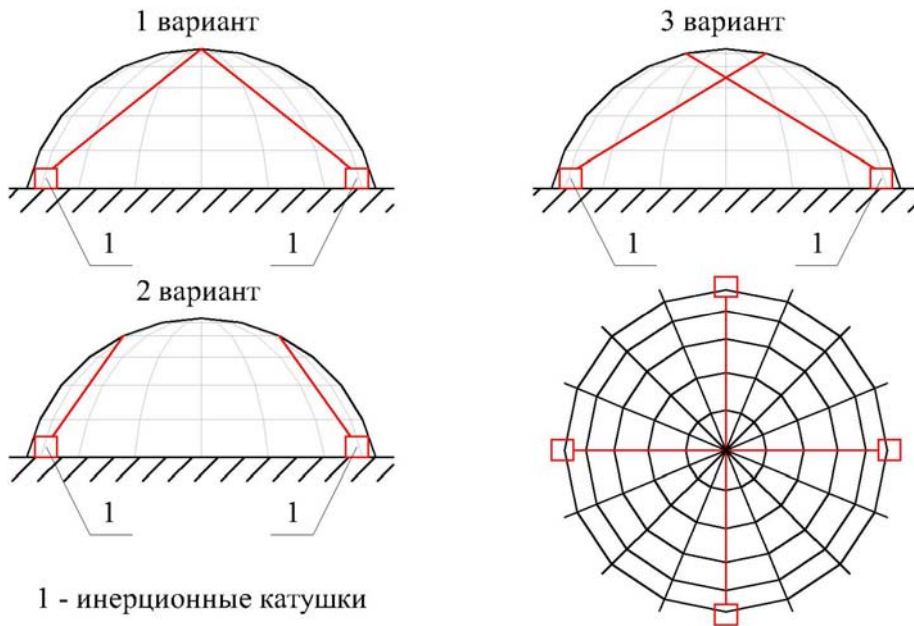


Рис. 5. Варианты установки ленточного гасителя колебаний

При введении гасителя колебаний размах колебаний полюса существенно уменьшается. Сравнение графиков колебаний купола без гасителя и с гасителем показано на рис. 6.

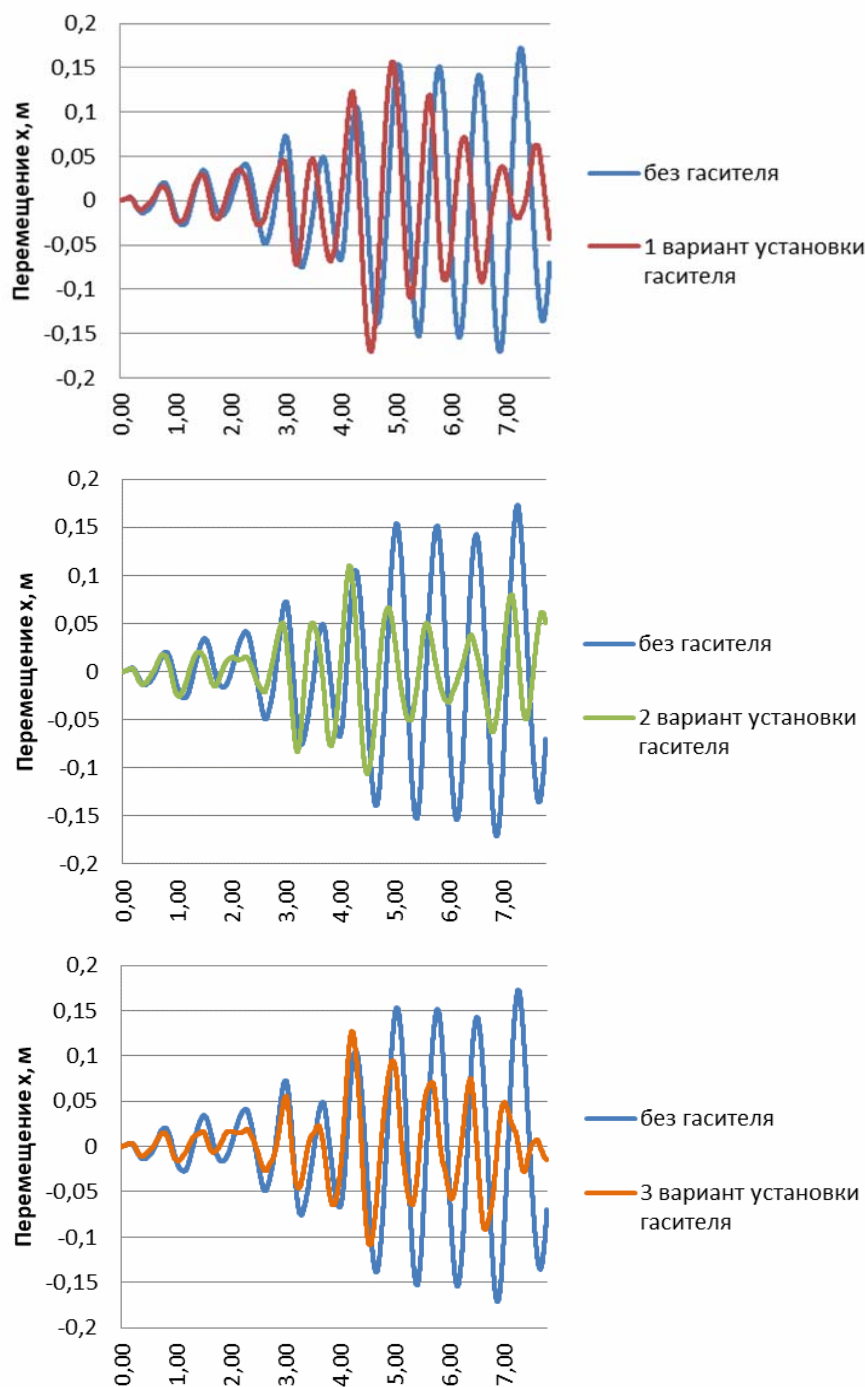


Рис. 6. Графики перемещений полюса купола по оси  $x$  с различными вариантами установки гасителя

До момента времени 4,31 с при относительно малых перемещениях для всех трех вариантов установки гасителей наблюдается небольшое гашение колебаний (до 15 %). На следующем отрезке времени при первом варианте гасителя колебаний (максимальное перемещение достигает 164 мм за 2,4с) амплитуда плавно уменьшается до 36 мм; при втором (трапециевидном) варианте установки гасителя (здесь максимальное значение перемещения 109 мм) наблюдается более резкое уменьшение амплитуды колебаний по сравнению с остальными вариантами; при третьем варианте установки

(максимальная амплитуда 127 мм за 2,9 с) размах колебаний плавно уменьшается до 8 мм. Наиболее рациональным вариантом выглядит второй, поскольку максимальное перемещение среди всех трех вариантов минимальное.

Определены границы значений  $f/L$ , для которых эффективен 2-й вариант расположения гасителя. Результаты вычислений сведены в таблицу.

Максимальные перемещения полюса купола, мм

$f/L$	max $x$	max $x$ (с гасителем)	max $z$	max $z$ (с гасителем)
0,50	201	138	87	75
0,45	167	104	118	86
0,40	172	109	81	69
0,35	113	78	67	43
0,30	73	38	68	54
0,25	44	36	59	58

### Выводы

Проведен динамический анализ колебаний куполов и выявлены виды колебательных движений. Проведены численные эксперименты с различными расположениями ленточного гасителя колебаний и определением наиболее рационального варианта ленточной системы для различных конфигураций куполов. Показано, что эффект гашения куполов достигается односторонними связями ленточных систем.

При втором (трапециевидном) варианте расположения гасителя для  $f/L > 0,25$  наблюдается значительное (более 50 %) снижение максимальных амплитуд колебаний куполов. Причем для других пиковых значений перемещений эффект гашения колебаний достигает 80 % (в период времени 4,31–7,8 с).

Таким образом, ленточные гасители являются эффективным средством гашения колебаний.

### Список литературы

1. Wei, De-Min. Seismic response analysis of K8 pattern single-layer reticulated domes under vertical rare earthquakes / De-Min Wei, Sheng-fu Gao // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 210. – P. 417–424.
2. Tornabene, Francesco. Vibration analysis of spherical structural elements using the GDQ method / Francesco Tornabene, Erasmo Viola // Computers & Mathematics with Applications. – 2007. – Vol 53. – P. 71538–1560.
3. Шеин, А.И. Инерционно преднатяжительная полиэстерно-ленточная система гашения колебаний циклически симметричных конструкций купольного типа / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2019. – № 10. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/pomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/pomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at_download/file)
4. Шеин, А.И. Ленточная система гашения колебаний локатора при сейсмических воздействиях / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2020. – № 3 (290). – С. 62–67.
5. Барабаш, М.С. Материальное демпфирование при расчете конструкций на динамические воздействия / М.С. Барабаш, А.В. Пикуль // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – № 13 (2). – С. 13–18.

### References

1. Wei, De-Min. Seismic response analysis of K8 pattern single-layer reticulated domes under vertical rare earthquakes / De-Min Wei, Sheng-fu Gao // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 210. – P. 417–424.



2. Tornabene, Francesco. Vibration analysis of spherical structural elements using the GDQ method / Francesco Tornabene, Erasmo Viola. // *Computers & Mathematics with Applications*. – 2007. – Vol 53. – P. 71538–1560.
3. Shein, A.I. Inertial pre-tensioning polyester-tape vibration damping system for cyclically symmetric dome-type structures / A.I. Shein, A.V. Chumanov // *Modeling and mechanics of structures*. – 2019. – № 10. – Systems. Requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at_download/file)
4. Shein, A.I. Tape system of radar vibration damping under seismic impacts / A.I. Shein, A.V. Chumanov // *Construction mechanics and calculation of structures*. – 2020. – No. 3 (290). – P. 62–67.
5. Barabash, M.S. Material damping in the calculation of structures for dynamic effects / M.S. Barabash, A.V. Pikul. // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2017. – No. 13 (2). – P. 13–18.

УДК 69.07

Петрозаводский государственный  
университет

Россия, 185910, г. Петрозаводск,  
просп. Ленина, д.33

**Селютина Любовь Федоровна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технология и организация  
строительства»  
E-mail: selutinalf@mail.ru

Petrozavodsk State University

Russia, 185910, Petrozavodsk, 33,  
Lenin avenue

**Selutina Lyubov Fyodorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Technology  
and organization of construction»  
E-mail: selutinalf@mail.ru

## ИСПЫТАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПОКРЫТИЯ

Л.Ф. Селютина

Представлены результаты расчетов и натурных испытаний железобетонных плит покрытия, изготовленных по серии 1.465-3. Предварительно напряженная арматура конструкций – канаты класса K1500. Испытаны 2 плиты. Даны описание конструкций плит, методика испытаний, основные результаты и их анализ. Приведены сведения о возможности сравнения результатов исследований железобетонных плит, армированных канатами класса K1500.

*Ключевые слова: железобетонная плита покрытия, испытания, несущая способность, трещиностойкость, прогибы, сравнение результатов*

## RESULTS OF STUDIES OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE 1PG12-2K7 COVERING SLABS

L.F. Selutina

The research of calculations and full-scale tests of reinforced concrete slabs made according to the 1.464-3 series is presented. Prestressed plate reinforcement is K1500 class ropes. Two plates were tested. The description of the plates design, tests procedure, main results and their analysis are given. Information about the possibility of comparing the results of studies of concrete slabs reinforced with ropes of class K7 is given.

*Keywords: reinforced concrete covering plate, tests, bearing capacity, crack resistance, deflection, results compare*

### Введение

Современное строительство характеризуется разнообразием возводимых зданий и сооружений и применяемых при этом материалов. Железобетонные плиты покрытия применяются при строительстве зданий различного функционального назначения. Обеспечение высокой эффективности, надежности и качества железобетонных конструкций невозможно без проведения исследований, приемочных и контрольных испытаний.

Испытания плит проводились согласно ГОСТ 8829-94 [1], Рекомендациям [2] с целью проверки соответствия нормативным требованиям в отношении несущей способности, трещиностойкости и жесткости.

### Приборы и оборудование

Установка для натяжения канатов (рис. 1), прибор для измерения натяжения канатов Tantron Oy MCS-160 (рис. 2), индикаторы часового типа «Эталон» с ценой деления 0,01 мм, прогибомеры бПАО с ценой деления 0,01 мм, микроскоп МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм.



Рис. 1. Установка для натяжения канатов



Рис. 2. Прибор для измерения натяжения канатов Tamtron Oy MCS-160

### Материалы

Проектный класс бетона В35. Прочность бетона определена при испытаниях стандартных бетонных образцов разрушающим методом (ГОСТ 10180-2012). Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Прочность бетона в день испытания плит покрытия

Марка плиты	Возраст бетона, сут	Кубиковая прочность бетона, кг/см <sup>2</sup>
1 ПГ12-2К7 (П-1)	34	465
1 ПГ12-2К7 (П-2)	45	497

Показатели качества арматуры приведены в табл. 2.

## Прочностные характеристики канатов по данным заводского сертификата

Разрывное усилие канатов (миним.)	164 кН
Усилие при условном пределе текучести (миним.)	153,475 кН
Относительное удлинение (миним.)	5,5
Отношение условного предела текучести к временному сопротивлению (миним./макс.)	0,92/ 0,9217

## Расчеты плит 1ПГ12-2К7

Расчеты плит 1ПГ12-2К7 выполнены по 1-й и 2-й группам предельных состояний [3]. Характеристики бетона приняты по результатам испытаний стандартных бетонных кубов. Характеристики арматуры приняты по данным СП 63.13330 [3].

Конструкция плиты представлена на рис. 3.

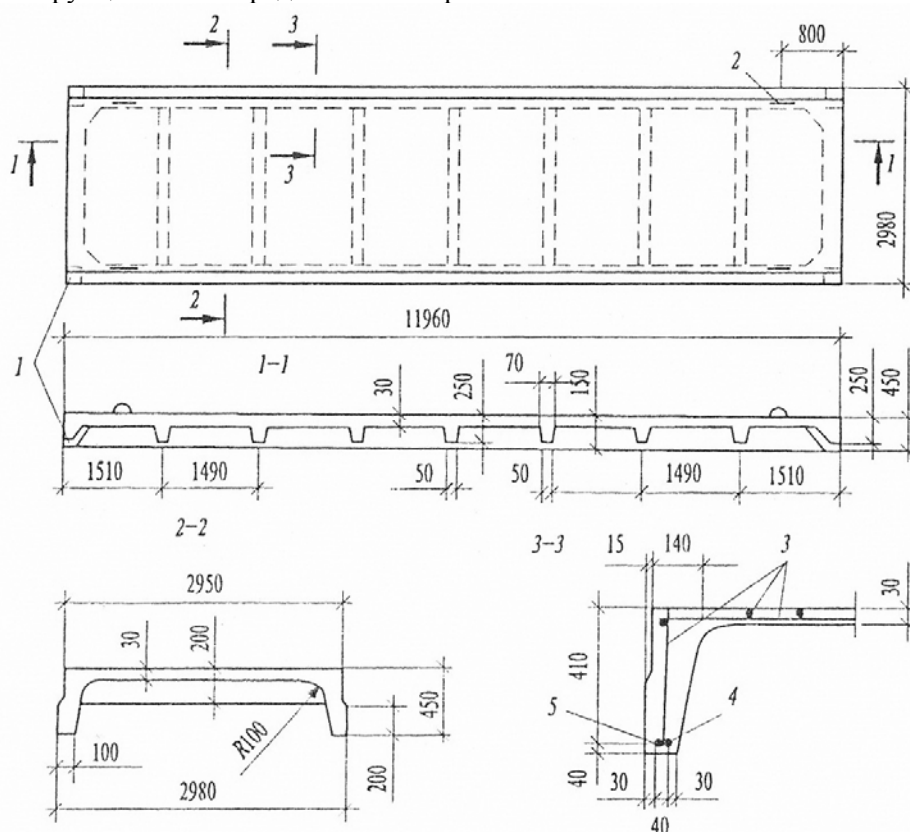


Рис. 3. Конструкция плиты 1ПГ 12-2К7:

1 – закладные детали; 2 – монтажные петли; 3 – сетка; 4 – 3 d12 К1500; 5 – d12 А400

## Испытания плит

Методика испытаний предусматривала поэтапное нагружение плиты до расчетных значений проектной нагрузки.

Закрепление плит на опорах, соответствующее требованиям, обеспечивало их свободные перемещения в продольном и ограничивало – в поперечном направлении [2].

Уровень предварительного натяжения канатов контролировался в процессе изготовления плит.

Перед испытанием производились измерения геометрических размеров плит, выгибов, положения напрягаемой арматуры по торцам конструкций.

Совместно с исследуемыми конструкциями изготавливались бетонные кубы, испытание которых осуществлялось одновременно с плитами.

Загружение производилось штучными грузами в соответствии с ГОСТ 8829-94. Вид плиты при испытании представлен на рис. 4.



Рис. 4. Загрузка плиты 1ПГ-12-2К7. Панорама

Приборы для измерения осадок опор (индикаторы) и прогибов (прогибомеры) установлены в четвертях и в середине пролета по длинным сторонам плиты; индикаторы для измерения проскальзывания арматуры в бетоне – на канатах по торцам плиты.

Контрольные нагрузки по рабочим чертежам без учета собственного веса плиты:

230 кг/м<sup>2</sup> – при оценке трещиностойкости;

306 кг/м<sup>2</sup> – при оценке жесткости с контрольным значением прогиба 1,7 см;

410 кг/м<sup>2</sup> – при первом случае разрушения (от текучести арматуры);

490 кг/м<sup>2</sup> – при втором случае разрушения (от раздробления бетона).

#### Образование и раскрытие трещин

Трещины (плита П-1) образовались при нагрузке 306 кг/м<sup>2</sup>, что превышает в 1,328 раза величину, указанную в рабочих чертежах серии. Ширина раскрытия трещин менее 0,05 мм (примерно в 2,5 раза менее цены деления шкалы прибора). Теоретическая ширина раскрытия трещин при нагрузке 230 кг/м<sup>2</sup> равна 0,0255 мм.

Вид плиты с трещинами показан на рис. 5.

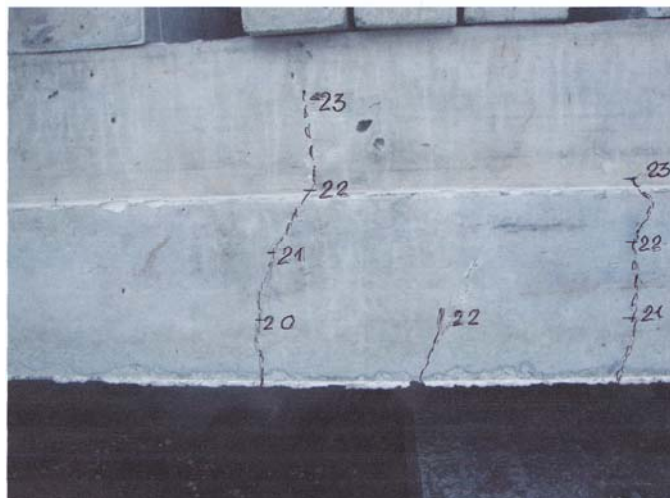


Рис. 5. Трещины в середине пролета плиты 1ПГ -12-2К7 (плита П-1)

Базовое (без учета вида внешней поверхности арматуры) расстояние между смежными нормальными трещинами  $l_s = 120$  мм [3]. Расстояние между трещинами при нагрузке 169,32 кН: от индикатора И1 (левая опора плиты) – 305 см; от прогибомера П1 (в четверти пролета плиты) – 75 см, 60 см, 64 см, 50 см, 45 см; от прогибомера П2 – 38 см, 92 см, 50 см.

### Прогибы плиты

Прогиб плиты при контрольной нагрузке равен 5 мм. Прогиб плиты, рассчитанный по СП 63.13330.2018 [3], составляет 14 мм. Изменение деформаций плиты П-1 при испытании представлено на рис. 6.

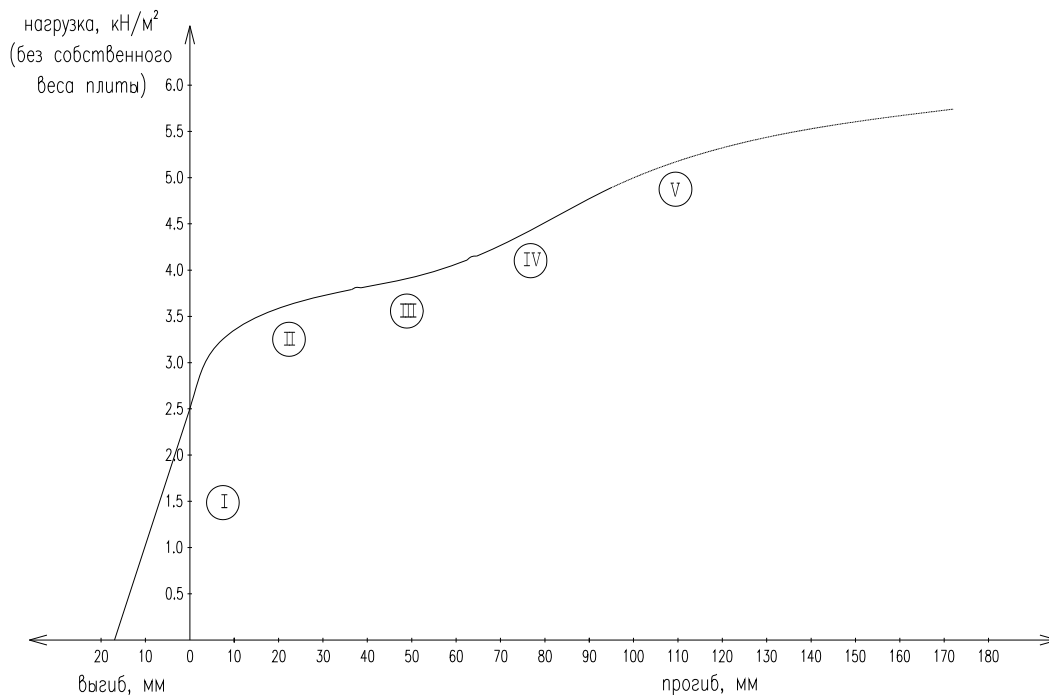


Рис. 6. График зависимости деформаций от величины нагрузки (плита П-1)

Пояснения к рис. 6:

Область I – упругая работа. Конец области I – непосредственно перед образованием первых трещин. Напряжения бетона в растянутой зоне достигают предела прочности бетона при растяжении, и происходит образование трещин. Область II – образование трещин. Область III – появление новых трещин, развитие существующих трещин. Область IV – увеличение ширины раскрытия и высоты трещин. Область V – пунктиром показано развитие деформаций плиты при увеличении нагрузки до предельного значения (с коэффициентом безопасности 1,6 [1]). Интенсивное образование трещин происходило в областях II, III.

### Разрушение плиты

Характер разрушения плит П-1, П-2 пластический. В интервале нагрузок 129,72–176,8 кН прогибы увеличились в 4,66 раза, а в интервале нагрузок 176,18–206,64 кН – в 7 раз. Вследствие значительных деформаций арматуры происходят резкое раскрытие трещин, увеличение прогибов, сокращение высоты сжатой зоны бетона и рост напряжений в нем.

Характер разрушения плит в данных исследованиях отличается от характера разрушения, отмеченного в работе [6]: при появлении первой (единственной) трещины произошло внезапное разрушение многопустотных плит. (Плиты армированы канатами класса K1500.)

### Проскальзывание арматуры

Проскальзывания арматуры в процессе испытаний не происходило.

### О возможности сравнения результатов исследований с данными испытаний, выполненных другими авторами

Для корректного сравнения результатов исследований необходимо выполнение нескольких условий [4]: совпадение напряженного состояния конструкций, наличие сведений о классе бетона по прочности на сжатие, классе арматуры, проценте армирования, уровне предварительного напряжения арматуры, технологии изготовления, процессе испытаний и др. Такие сведения не всегда присутствуют в опубликованных источниках.

Известны сведения об испытаниях ребристой плиты серии 1.465.1-318 длиной 12 м [5]. Армирование плиты выполнено арматурой Атп-У (Ат 800).

Сведений об испытаниях ребристых плит, армированных арматурой класса К1500 (К7), не обнаружено.

Рассмотрены данные испытаний многопустотных плит перекрытий безопалубочного формования [6, 7]. Обратимся к статье авторов В.Н. Воронова, В.В. Михайлова, С.Н. Рожиной [6]. Класс арматуры К1500, процент армирования  $\mu \% = 0,19 \%$ . (Процент армирования в настоящих исследованиях  $\mu \% = 0,73 \%$ .) Отношение условного предела текучести к временному сопротивлению 0,944. Нет данных о потерях предварительного напряжения арматуры, усилиях предварительного обжатия. Основное отличие состоит в характере разрушения и количестве трещин. Сравнение результатов испытаний железобетонных плит представлено в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Сравнение показателей железобетонных плит, армированных канатами К1500

Марка плиты	Класс бетона	Армирование напрягаемой арматурой		Условный предел текучести/временное сопротивление	Характер разрушения
		в нижней зоне	в верхней зоне		
ПБ 60-12-8 Многопустотная плита безопалубочного формования [6] (3 плиты)	В40	4d12 К1500 $\mu \% = 0,19 \%$	4d4 ВрII	0,944	Внезапный при образовании одной трещины
1ПГ12-2К7 Железобетонная ребристая плита (2 плиты)	В35	6d12 К1500 $\mu \% = 0,73 \%$	–	0,92	Пластический (постепенный, плавный)

### Выводы

1. Выполнены расчеты и испытания плит покрытия, изготовленных по серии 1.465-3. Плиты с номинальными размерами  $3 \times 12$  м ( $b \times l$ ), высотой 450 мм. Класс бетона по прочности на сжатие В35; армирование арматурой 6d12 К1500.

2. Произведены расчеты плиты по трещиностойкости, жесткости и несущей способности (СП 63.13330.2018 [3]).

3. Представлены сведения о методике испытаний.

4. Несущая способность, трещиностойкость, жесткость плит удовлетворяют требованиям ГОСТ 8829-94.

5. В процессе испытаний при нагрузках, не превышающих расчетных предельных значений, в плите не обнаружены нормальные и наклонные трещины; ширина раскрытия трещин и прогибы не превышали расчетных значений; проскальзывания канатов в бетоне не наблюдалось.

6. Нагрузка при образовании трещин в опытных плитах больше теоретической в 1,328–1,4 раза.

7. Прогибы плит при контрольной нагрузке меньше опытных значений в 3,3–3,4 раза, а теоретических значений – в 2,7–2,8 раза [3].
8. Характер разрушения плит покрытия пластический.
9. Опытная разрушающая нагрузка плит больше теоретических величин в 1,83–1.86 раза.
10. Рассмотрена возможность корректного сравнения результатов испытаний с данными других авторов [5–7]. Отмечено отличие характера трещинообразования и разрушения многопустотных плит, представленных в статье В.Н. Воронова, В.В. Михайлова, С.Н. Рощиной [6], при армировании конструкций предварительно напряженной арматурой класса К1500. Причинами такого разрушения являются незначительное содержание рабочей арматуры и высокий класс бетона.
11. Результаты данных исследований рекомендуется использовать с целью совершенствования методов расчета предварительно напряженных железобетонных конструкций, армированных канатами класса К1500.

### Список литературы

1. ГОСТ 8829-94. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости / Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве. – М.: ГУП ЦПП, 1997. – 27 с.
2. Рекомендации по испытанию и оценке прочности, жесткости и трещиностойкости опытных образцов железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – М., 1987. – 35 с.
3. СП 63.13330.2018. Актуализированная редакция СНиП «Бетонные и железобетонные конструкции». – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018. – 150 с.
4. Danilov, A.M. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A.M. Danilov, I.A Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol.8, No. 5. – P.219–225. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.517>.
5. Дудина, И.В. Методика натурных испытаний железобетонных ребристых плит покрытий / И.В. Дудина, Е.В. Нестер // Системы. Методы. Технологии: научный журнал Братского государственного университета. – 2011. – №1(9). – С. 113–118.
6. Воронов, В.Н. Результаты контрольных испытаний многопустотных предварительно напряженных плит перекрытия стендового безопалубочного формования / В.Н. Воронов, В.В. Михайлов, С.И. Рощина // Научно-технический вестник Поволжья: сборник научных статей. – Казань, 2011. – №5. – С. 89–92.
7. Шмуклер, В.С. Особенности внедрения железобетонных многопустотных предварительно напряженных плит перекрытий безопалубочного стендового формования / В.С. Шмуклер, Е.Г. Стоянов, О.М. Пустовойтова, Е.М. Тертичный, И.Г. Львовский, Р.В. Корнев // Коммунальное хозяйство міст. – 2014. – Вып. 114. – С. 22–30.

### References

1. Reinforced concrete construction products and factory-made concrete products. Methods of loading tests. Rules for evaluating strength, stiffness and crack resistance / Interstate scientific and technical commission for standardization, technical regulation and certification in construction. – M., 1997. – 27 p.
2. Recommendations for testing and evaluating the strength, stiffness and crack resistance of test samples of reinforced concrete structures / NIIZB. – M., 1987. – 35 p.
3. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Update version of SNiP 52-012018. – M.: Minregion Rossii, 2018. – 150 p.



4. Danilov, A.M. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A.M. Danilov, I.A Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol.8, No. 5. – P.219–225. – URL.: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.517>.
5. Dudina, I.V. Method of full-scale testing of reinforced concrete ribbed covering plates / I.V. Dudina, E.V. Nester // Systems. Methods. Technologies: scientific journal of Bratsk state University. – 2011. – №1(9). – P. 113–118.
6. Voronov, V.I. Results of control tests of multi-hollow prestressed floor slabs for bench forming without formwork / V.I. Voronov, V.V. Mikhajlov, C.I. Roshchina // Bulletin of Volga region collection of scientific works scientific electronic library. – Kazan, 2011. – №5. – P. 89–92.
7. Schmukler, V.S. Features of implementation reinforced concrete multihollow prestressed floor which formed without timbering / V.S. Schmukler, E.G. Stoyanov, O.M. Pustovoytova, E.M. Tertychnyi, I.G. Lvivskyi, R.V. Korenev // Municipal services in cities. – 2014. – Release 114. – P. 22–30.

УДК 693.554.3

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

**Нежданов Кирилл Константинович,**

доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»

**Артюшин Дмитрий Викторович,**

кандидат технических наук, доцент,  
декан Инженерно-строительного института  
E-mail: artyushin\_dv@mail.ru

**Пигина Анастасия Сергеевна,**

магистрант

*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 Constructions»

**Artyushin Dmitriy Viktorovich,**

Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Dean of the Civil Engineering Institute  
E-mail: artyushin\_dv@mail.ru

**Pigina Anastasia Sergeevna,**

Undergraduate student

## НОВЫЙ СПОСОБ АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

К.К. Нежданов, Д.В. Артюшин, А.С. Пигина

Предложен новый способ армирования железобетонных конструкций высокопрочными тканями сетками из легированных хромистых коррозионностойких проволок и стальной арматурой с рифами, расположенными по винтовой спирали. Обосновано преимущество разработанного способа армирования железобетонных конструкций по сравнению с известными традиционными аналогами.

*Ключевые слова: железобетонные конструкции, изготовление, надежность и прочность, автоматизация, новый способ армирования, армирующая обойма, технологичность соединений арматуры, снижение трудоемкости*

## NEW METHOD OF CONCRETE STRUCTURES REINFORCEMENT

K.K. Nezdanov, D.V. Artyushin, A.S. Pigina

A new way of concrete structures reinforcement with high-strength woven nets made of alloyed chromium corrosion-resistant wires and steel reinforcement with reefs arranged along a helical spiral is proposed. Possible advantages of the developed way of reinforcement of concrete structures in comparison with the known traditional analogs are given.

*Keywords: reinforced concrete structures, production, reliability and strength, automatization, new way of reinforcement, reinforcing cage, manufacturability of reinforcement connections, reduced labor intensity*

До настоящего времени остается актуальным снижение трудоемкости изготовления несущих конструкций для зданий и сооружений при одновременной автоматизации способов их возведения и повышении прочности и надежности.

Традиционно при изготовлении монолитных и сборных железобетонных конструкций применяется горячекатаная гладкая или периодического профиля арматура из углеродистой и низколегированной стали марок Ст3, 25Г2С, 35ГС, 30ХГ2С. Поверхность рифленой арматуры периодического («кольцевого», «серповидного») профиля для увеличения ее сцепления с бетоном снабжают гребнями (рифами), которые образуются прокатом в горячем состоянии в продольном направлении стержня и периодически повторяются по всей его длине. При этом такая арматура имеет избыточную гибкость, что сдерживает ее применение в качестве жесткой (для которой используются прокатные профили – двутавры или швеллеры), воспринимающей вес подвесной опалубки и твердеющего бетона монолитных конструкций.

Основным недостатком в применении указанных профилей арматуры является то, что для ее стыковки приходится использовать ручную сварку, т.е. недостаточно технологичный процесс, при котором в полной мере не обеспечивается равнопрочность соединений. Процесс ручной сварки арматурных каркасов достаточно трудоемок, к тому же на строительной площадке автоматизация сварки осложнена. В зимних условиях качество и надежность стыков, а следовательно, и всего сооружения снижаются.

В настоящее время уже начат промышленный выпуск инновационной арматуры нового поколения – винтовой, гребни которой накатывают в горячем состоянии на прокатном стане поперечной накаткой по правой или левой винтовой, однозаходной или многозаходной спирали [1]. Новая арматура изготавливается по традиционной технологии и имеет себестоимость не выше себестоимости обычной арматуры. Надежность, производительность и технологичность равнопрочных соединений такой арматуры значительно повышаются, так как они выполняются с помощью гаек или винтовых муфт без дополнительной обработки стыкуемых стержней. При этом следует заметить, что винтовая арматура имеет увеличенную внешнюю поверхность, контактирующую с бетоном, что увеличивает ее сцепление с бетоном, а следовательно, и анкеровку. Не случайно Научный совет РААСН «Железобетонные конструкции, методы расчета и проектирования» в июне 2018 г. отметил целесообразность массового внедрения нового инновационного арматурного профиля с винтообразным расположением поперечных ребер с целью достижения лучших показателей сцепления арматуры по сравнению с «европейским» профилем и «кольцевым» по ГОСТ 5781-82.

В чрезвычайной ситуации при возникновении пожара и повышении температуры до 600°C модуль упругости стальной арматуры стремится к нулю, что приводит к *обрушению* конструкции. Обрушение же конструкции, изготовленной с применением винтовой арматуры трубчатого профиля [2, 3], можно исключить прокачкой воды сквозь каналы в арматуре, тем самым *предотвратив* при пожаре катастрофическое обрушение сооружения в целом.

Хорошо известно, что для автомобильных и авиационных колес широко применяют эффективное армирование *высокопрочными стальными тканями сетками* (кордами) из проволок, применение которых позволяет значительно повысить надежность и прочность шин. Такие сетки ткнут на текстильных станках, а сам способ их изготовления автоматизирован и весьма высокопроизводителен. Известен и способ армирования фундаментов и стен зданий и сооружений сеткой из корда [4], который позволяет повысить надежность, прочность и жесткость таких конструкций. Этот способ автоматизирует возведение монолитных стен с применением замкнутых рукавов из высокопрочного тканого текстильного корда, образующего сетчатую армирующую ткань.

Перечисленные технические решения можно принять за прототипы для разработки нового способа армирования железобетонных конструкций высокопрочными, хромистыми стальными проволоками, образующими замкнутые в сечении сетки в виде длинных рукавов – *кольчуг* [5]. Стальные кольчуги обладают не только высокой прочностью, но, кроме того, сама структура их тканой поверхности обеспечивает качественное, надежное сцепление с бетоном и гарантирует надежную анкеровку в бетоне без проскальзывания. Непрерывные, проектной длины кольчуги из корда работают как внешние обоймы, армирующие и упрочняющие бетон, изготовленный с использованием расширяющегося цемента. Предлагаемый способ армирования железобетонных конструкций стальными кольчугами в зонах растяжения, среза и сжатия отличается тем, что армирование выполняется высокопрочной стальной легированной арматурой с рифами, расположенными по винтовой спирали [2, 3], и кольчугами, ткаными из легированных хромистых проволок, стойких к коррозии, марок 40X Селект, 15 ХСНД, 30ХЗМФ, 30Х2НМФ [6]. Поверхность стальных проволок кольчуг может быть дополнительно защищена от коррозии, например, электрохимическим хромированием. Следует заметить, что для кольчуг может применяться как высокопрочная стальная хромированная проволока, так и высокопрочное углеродистое волокно, не поддающееся коррозии.

Замкнутые кольчуги, а также ленты и замкнутые кольца (обручи) изготавливаются в заводских условиях на ткацких станках из высокопрочного тканого стального корда в соответствии с проектными размерами стандартных конструкций и направлением действия главных растягивающих напряжений. Поперечным сечениям кольчуг можно придавать различные сечения (круглое, овальное, прямоугольное, квадратное) и транспортировать свернутыми в рулоны. Гибкие тканые кольчуги могут быть как прямолинейными, так и криволинейными, в связи с чем их можно применять для армирования различных железобетонных конструкций (плит перекрытий, балок, фундаментов, куполов, арок, сводов) как заводского изготовления, так и монолитных [4].

Кольчуги легко соединяются *шивным* соединением, обеспечивающим быстроразъемность присоединения к нему патрубков гибкого напорного бетонопровода. С пульта управления бетононасосами нагнетают пластичный, *расширяющийся, самонапрягающийся* бетон внутрь гибких кольчуг. Нагнетаемый самонапрягающийся бетон вытесняет воздух из кольчуг через выпускные патрубки, а также сетку кольчуг. Кольчуги способом снизу вверх плотно заполняют бетоном на всю их длину и придают проектную форму конструкции, копирующую форму внешней опалубки, а затем перекрывают патрубки автоматическими клапанами. При схватывании бетон расширяется, однако кольчуги препятствуют расширению бетона, который тем самым предварительно напрягается и обжимается кольчугой объемно со всех сторон.

Предлагается приводимая ниже последовательность изготовления железобетонных конструкций с применением тканых кольчуг.

1. Для арматурных каркасов применяют трубчатую или сплошную арматуру с винтовой спиралью [1-3, 7], накатанной поперечной винтовой накаткой в горячем состоянии с закругленными рифами по синусоиде, которую предварительно защищают от коррозии хромированием (рис. 1).

2. Получают плоскую арматурную спираль силовым наматыванием арматуры на плоскую с закругленными краями консоль (витки наматывают плотно с примыканием друг к другу) (рис. 2).

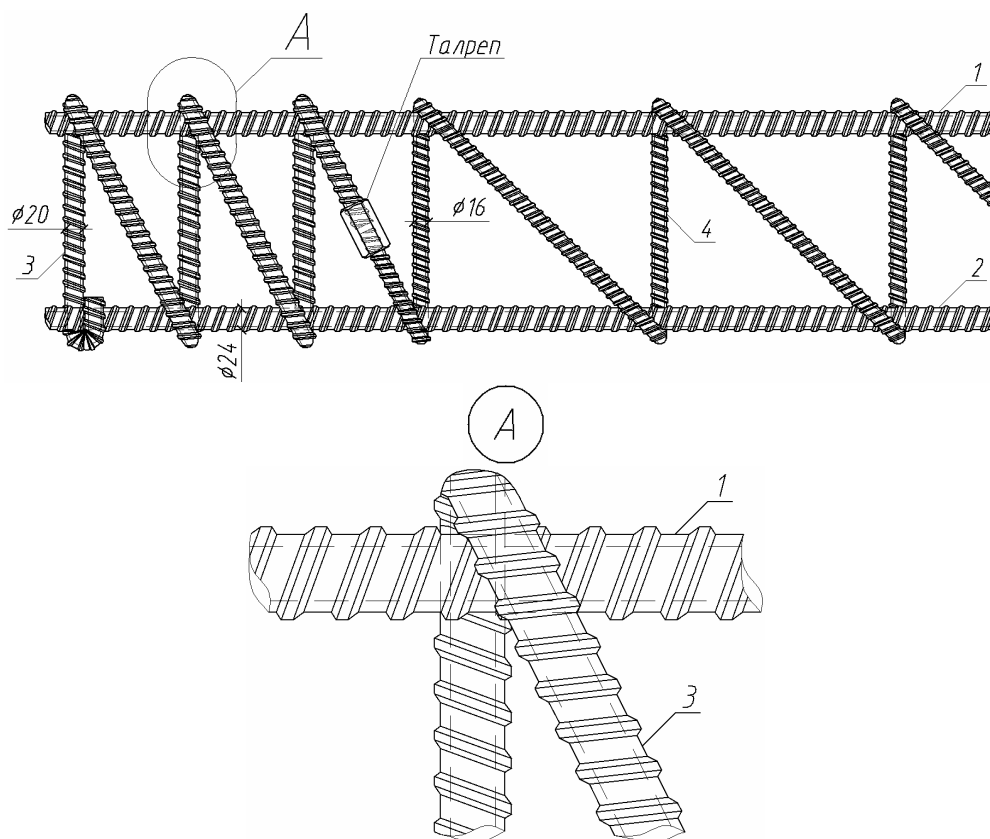


Рис. 1. Фрагмент арматурного каркаса

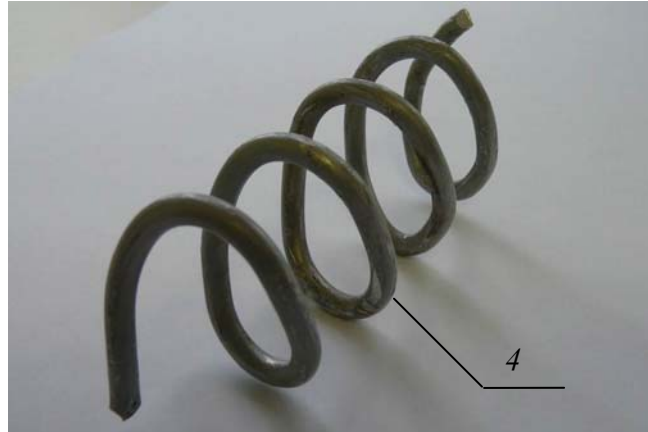


Рис. 2. Макет арматурной спирали

3. Затем плоскую арматурную спираль снимают с консоли и растягивают вдоль, образуя заданный проектом *расчетный* шаг витков.

4. Анкерные участки плоской арматурной спирали (длиной примерно в 3 витка) выполняют из стержней диаметром не менее половины диаметра продольной рабочей арматуры в середине пролета.

5. Соединяют анкерные участки плоской арматурной спирали с центральным участком плоской спирали (например, талрепом или мягкой отожженной проволокой).

6. В подготовленную плоскую арматурную спираль, состоящую из пары анкерных участков с частым проектным шагом витков, которые соединены с центральным участком с более крупным шагом витков, вдвигают с торца верхние и нижние продольные рабочие стержни (на рис. 1 показан арматурный каркас, состоящий из продольных стержней и спирали, имеющей вертикальные и наклонные элементы, ориентированные по направлению действия главных растягивающих напряжений).

7. Соединяют (например, с помощью талрепа) эти верхние и нижние продольные рабочие стержни с парой анкерных участков плоской спирали и с центральным участком спирали в единый продольный каркас.

8. На ткацких станках на поточной линии изготавливают армирующие кольчуги (рис. 3). Сетки кольчуг ткут из высокопрочных, хромированных проволок диаметром 1,5-2 мм в виде тканых рукавов проектной длины.

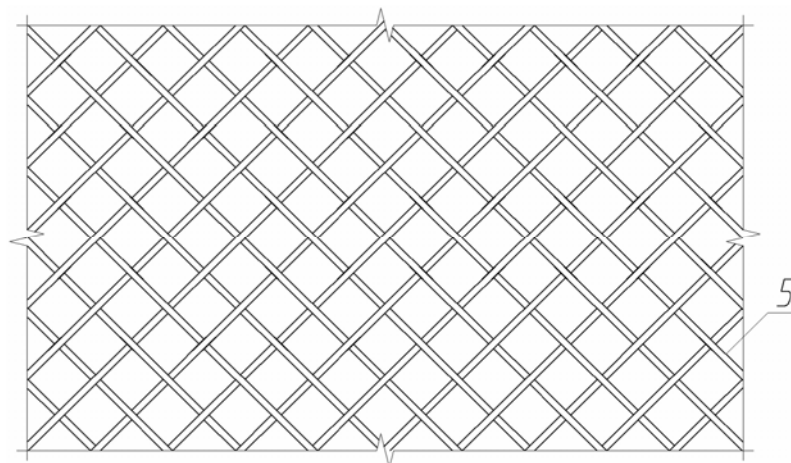


Рис. 3. Фрагмент армирующей кольчуги

9. В тканый рукав каждой высокопрочной кольчуги, являющейся армирующей обоймой, с торца вдвигают пару арматурных каркасов, снабженных по концам анкерными элементами, гнутыми по плоской винтовой спирали (рис. 4).

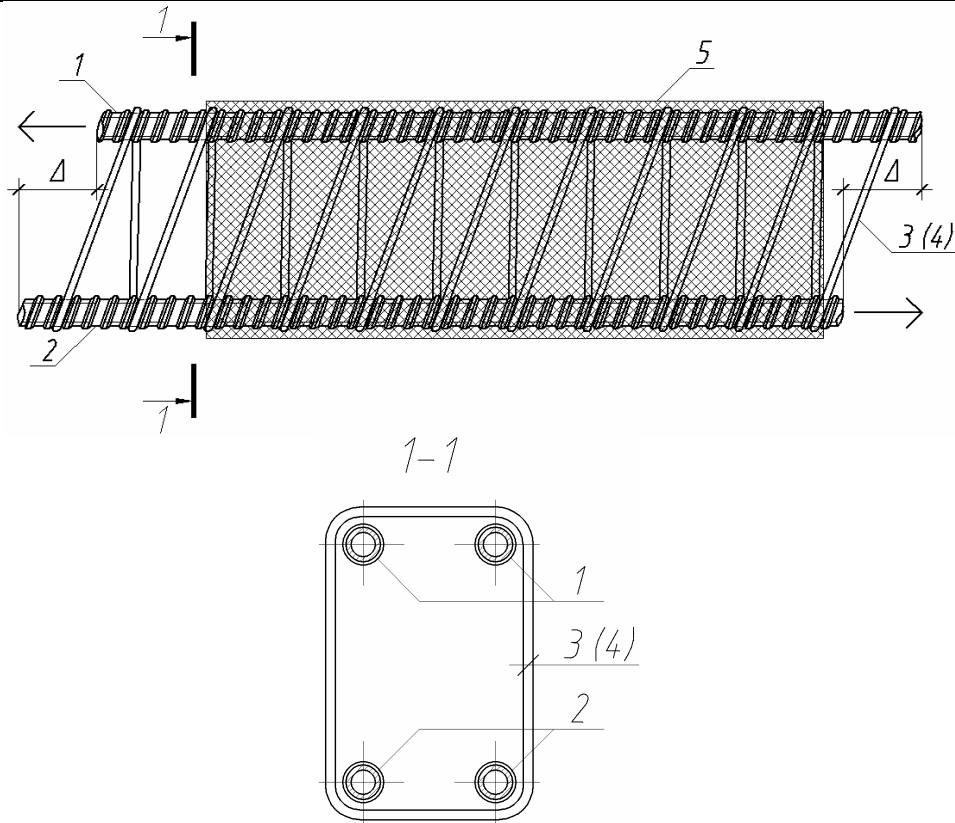


Рис. 4. Фрагмент смонтированного внутри кольчуги арматурного каркаса:

1 – верхний продольный стержень; 2 – нижний продольный стержень;  
 3 – анкерная спираль, состоящая из трех витков; 4 – спираль с разреженным шагом витков, соединенная с элементом 3 с помощью талрепа; 5 – тканная на ткацком станке армирующая кольчуга из высокопрочных стальных проволок, расположенных по направлению действия главных растягивающих напряжений

10. Пару арматурных каркасов внутри каждой кольчуги раздвигают друг от друга талрепами, натягивают кольчуги и придают им необходимую форму сечения.

11. Каждый арматурный каркас, вдвинутый внутрь кольчуги, заключают внутрь стальной съемной опалубки.

12. Для бетонирования применяют мелкозернистый, расширяющийся бетон, который транспортируют и нагнетают в кольчуги бетононасосом.

13. Уплотнение бетона выполняют центробежным способом (аналогично центробежному литью), при этом отжимается избыточная вода, улучшается водоцементное отношение и повышается прочность.

14. Выполняют пропаривание конструкции в пропарочных камерах с высоким давлением пара (до 20 атм), за счет чего ускоряется набор бетоном проектной прочности.

15. Демонтируют съемную опалубку и отправляют готовую конструкцию на строительную площадку.

Предлагаемый новый способ позволяет автоматизировать армирование железобетонных конструкций и повысить надежность, прочность и технологичность возведения зданий и сооружений, при этом в значительной степени снижая трудоемкость изготовления конструкций.

Сопоставление разработанного способа армирования железобетонных конструкций с известными традиционными аналогами показывает следующие возможные существенные преимущества:

- Надежность и прочность конструкций повышается, так как они армируются высокопрочными кольчугами, работающими как внешние обоймы, обжимающие расширяющийся бетон конструкций.

- Хромирование проволок кольчуг предохраняет их от коррозии, а расширяющийся со всех сторон, самонапрягающийся бетон исключает растрескивание. После набора проектной прочности бетона получается предварительно-напряженная железобетонная конструкция, которая работает как единое целое и в которой все соединения выполнены быстроразъемными и равнопрочными.
- В результате уменьшения вероятности разрушения несущих конструкций сооружений и зданий (железнодорожных и автомобильных мостов, высоких труб, путепроводов, многоэтажных высотных зданий и других объектов промышленного и гражданского строительства) достигается ощутимый экономический эффект. Экономический эффект также получается за счет повышения надежности, прочности, технологичности возведения и увеличения срока безопасной эксплуатации и службы конструкций, изготовленных из самонапрягающегося бетона.
- Технологический процесс возведения конструкций автоматизируется, что позволяет значительно увеличить скорость их возведения и повысить долговечность сооружений в целом, максимально снизив трудоемкость.
- Предлагаемый способ армирования железобетонных конструкций прошел апробацию в лабораторных условиях, подтверждающую эффективность его применения.

### Список литературы

1. ТУ 14-1-5254-2006. Прокат периодического профиля для армирования железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ – филиал ФГУП «НИЦ «Строительство», 2006.
2. Пат. 2467075 Российская Федерация. Способ проката горячекатаной арматуры периодического профиля / Нежданов К.К., Нежданов А.К., Артюшин Д.В. – Оpubл. 20.11.2012, Бюл. №32.
3. Нежданов, К.К. Новый вид винтовой горячекатаной арматуры для железобетонных конструкций / К.К. Нежданов, Д.В. Артюшин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 71–74.
4. Пат. 2324789 Российская Федерация. Автоматизированный способ возведения монолитных фундаментов и стен зданий / Нежданов К.К., Хвастунов В.Л., Нежданов А.К. – Оpubл. 20.05.2008, Бюл. №14.
5. Пат. 2716182 Российская Федерация. Способ армирования монолитных и сборных железобетонных конструкций / Нежданов К.К., Артюшин Д.В. – Оpubл. 06.03.2020, Бюл. № 7.
6. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. – М.: Минрегион России, 2011.
7. Пат. 2573304 Российская Федерация. Способ изготовления стержневой и трубчатой арматуры из высокопрочной коррозионно-стойкой стали / Нежданов К.К., Расторгуев С.И., Нежданов А.К. – Оpubл. 20.01.2016, Бюл. №2.

### References

1. TU 14-1-5254-2006. Rolled periodic profile for reinforcement of reinforced concrete structures. – M.: SRICRC – branch of FSUE «SRC» Construction», 2006.
2. Pat. 2467075 Russian Federation. Method of rolling hot-rolled rebars of periodic profile / Nezhdanov K.K., Nezhdanov A.K., Artyushin D.V. – publ. 20.11.2012, Bul. No. 32.
3. Nezhdanov, K.K. New type of helical hot-rolled reinforcement for reinforced concrete structures / K.K. Nezhdanov, D.V. Artyushin // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 3. – P. 71–74.
4. Pat. 2324789 Russian Federation. An automated method for the construction of monolithic foundations and walls of buildings / Nezhdanov K.K., Khvastunov V.L., Nezhdanov A.K. – publ. 20.05.2008, Bul. No. 14.
5. Pat. 2716182 Russian Federation. Method of reinforcement of monolithic and prefabricated reinforced concrete structures / Nezhdanov K.K., Artyushin D.V. – publ. 06.03.2020, Bul. No. 7.
6. SP 16.13330.2011. Steel structures. Updated edition of SNiP II-23-81 \*. – M.: Ministry of Regional Development of Russia, 2011.
7. Pat. 2573304 Russian Federation. A method of manufacturing rod and tubular reinforcement from high-strength corrosion-resistant steel / Nezhdanov K.K., Rastorguev S.I., Nezhdanov A.K. – publ. 20.01.2016, Bul. No. 2.

УДК 502.174:334.716.4

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

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

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

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

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

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

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

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

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

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

С целью повышения конкурентоспособности промышленных предприятий как на внутреннем, так и на внешнем рынке необходимо создание оптимальных условий для выпуска высококачественной продукции. Для решения этой задачи используется комплекс эффективных способов управления качеством продукции. Высокой производительности труда и снижения потерь можно достичь путем использования концепции бережливого производства, предполагающей вовлечение в процесс оптимизации деятельности каждого сотрудника с учетом ориентации на потребителя. С целью оценки эффективности внедрения концепции бережливого производства проводится постоянный мониторинг. В статье представлен анализ применения инструментов бережливого производства на примере деятельности организации, которая разрабатывает и выпускает металлические конструкции для нефтегазовой, металлургической и нефтехимической отраслей промышленности.

*Ключевые слова: процесс, бережливое производство, критерии, оценка эффективности*

## EFFICIENCY OF LEAN PRODUCTION OF METAL STRUCTURES FOR OIL AND GAS, METALLURGICAL AND PETROCHEMICAL INDUSTRIES

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

In order to increase the competitiveness of industrial enterprises both in the domestic and foreign markets, it is necessary to create optimal conditions for the production of high-quality products. To solve this problem, a complex of effective methods of product quality management is used. High labor productivity and reduction of losses can be achieved by using the concept of lean production, which implies the involvement of each employee in the process of optimizing his activities, taking



into account customer orientation. The effectiveness of the application of this concept requires constant monitoring in order to assess the effectiveness of the implementation of the concept of lean production. The article presents an analysis of the use of lean manufacturing tools on the example of the activities of a plant that develops and produces metal structures for the oil and gas, metallurgical and petrochemical industries.

*Keywords: process, lean manufacturing; criteria, performance evaluation*

В настоящее время на промышленных предприятиях Пензенского региона большое внимание уделяется организации производства с применением инструментов бережливого производства, таких, как TPM, 5S, SMED, Just In Time, картирование потока создания ценности, Канбан и др.

Пензенские организации, например ОАО «ПТПА», ОАО «Электромеханика», ОАО «Пенздизельмаш» и многие другие, переходят на новую производственную систему с целью повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции и организации в целом, а также обеспечения роста эффективности своего бизнеса за счет методов и инструментов бережливого производства, которые, в свою очередь, позволяют производить продукцию или оказывать услуги в минимальные сроки, с минимальными затратами и с необходимым для потребителя качеством.

Бережливое производство (lean production) — концепция организации бизнеса, направленная на создание привлекательной для потребителя ценности за счет формирования непрерывного потока создания ценности и постоянного совершенствования всех процессов через вовлечение персонала и устранение всех видов потерь [1].

Главной же целью бережливого производства (БП) является процесс устранения потерь. Под потерями же в общем случае понимается любое действие, которое потребляет ресурсы, но не создает какой-либо ценности для потребителя [2-4].

В рамках БП выделяют восемь видов потерь [1]:

1. Потери перепроизводства (избыточного производства продукции).
2. Потери транспортировки (избыточное перемещение сырья, продукции, материалов).
3. Потери ожидания (в рабочее время не осуществляется производственная деятельность).
4. Потери из-за наличия запасов (избыточного количества сырья, материалов, полуфабрикатов).
5. Потери из-за производства продукции с дефектами (брак).
6. Потери излишней обработки (обработка, не приносящая ценности или добавляющая ненужную функциональность).
7. Потери на лишние движения (не связанные напрямую с осуществлением производственной деятельности).
8. Потери творческого потенциала (неполное использование возможностей человеческого ресурса).

Внедрение БП позволит получить существенный экономический эффект и обеспечит организацию определённым конкурентным преимуществом [5,6].

Для компании ОАО «Пензхиммаш», осуществляющей производство крупногабаритного оборудования для нефтехимической, газовой, машиностроительной, металлургической отраслей, проведена оценка конкурентоспособности организации (табл. 1) путем построения многоугольника конкурентоспособности. Многоугольник конкурентоспособности приведен на рис. 1.

Важнейшая цель организации любой формы собственности и отраслевой принадлежности – получение дохода за счет реализации потребителям производимой продукции (выполненных работ, оказанных услуг), т.к. на основе полученного дохода удовлетворяются социальные и экономические запросы трудового коллектива и собственника.

Цели ОАО «Пензхиммаш» на 2021 год по критериям деятельности организации приведены в табл. 2.

Оценка конкурентоспособности оборудования, выпускаемого ОАО «Пензхиммаш»

Критерии конкурентоспособности	ОАО ПХМ	Конкурент 1*	Конкурент 2*
1 Ассортимент	8	7	7
2 Цена	7	9	6
3 Внешний вид	7	7	9
4 Качество	9	9	8
5 Безопасность	9	10	9
6 Рекламная активность	3	4	8
7 Уникальность предложения	7	10	8
8 Знание бренда (торговой марки)	7	6	9
9 Индивидуальный подход к каждому заказу	10	10	10
10 Качество подготовки персонала	7	7	8
11 Наличие компании в «Рейтинге производителей оборудования, каталогизаторов и инжиниринговых компаний для нефтегазопереработки»	7	3	7

П р и м е ч а н и е . Конкурент 1\* – ООО «Пензенский завод крупногабаритного оборудования»; конкурент 2\* – ОАО «Научно-исследовательский и проектно-технологический институт химического машиностроения».

Оценка конкурентоспособности товара компании и товара конкурентов произведена по 10-балльной шкале, где 1 – самый низкий балл, а 10 – максимальный балл.



Рис. 1. Многоугольник конкурентоспособности» ОАО «Пензхиммаш»

Цели ОАО «Пензхиммаш» на 2021 год

Критерии деятельности	Цель
1	2
Экономика	1. Укрепление финансовой устойчивости организации 2. Обеспечение средней нормы доходности акционерного капитала на уровне 8-10 % 3. Рост валового дохода на 10 % 4. Увеличение рентабельности товарной продукции на 5 %

1	2
Качество	1. Уровень сдачи деталей и узлов ОТК с первого предъявления – 98 % 2. Уровень сдачи изделия ОТК с первого предъявления – 96 % 3. Отсутствие внешних претензий и рекламаций 4. Отсутствие потерь от брака
Производство	1. Выполнение плана по объему выпуска в н/ч, в процентном соотношении (факт/план), не менее 100 % 2. Увеличение объема производства на 10 % по сравнению с предыдущим годом 3. Качество сварных швов (планируемое значение критерия – 99,4 %) 4. Отсутствие карт отступления по вине производственного участка (планируемое значение критерия – 100 %)
Безопасность	1. Вывод из эксплуатации изношенного оборудования (исключение применения тяжёлого оборудования, снижение риска получения травмы, риска поражения током) в количестве пяти единиц 2. Укомплектование 100 % помещений организации огнетушителями 3. Минимизация профессиональных заболеваний, увечий и несчастных случаев на производстве и т.д.
Маркетинг	1. Расширение рынка: – увеличение количества потребителей на российском рынке – расширение поставок на рынках стран СНГ – выход на рынки стран дальнего зарубежья – активная работа с компаниями западной Европы и компаниями США, которые осуществляют крупные российские проекты по нефтепереработке, добыче газа и разработке новых месторождений полезных ископаемых 2. Повышение удовлетворенности потребителей на 5 % по сравнению с предыдущим периодом 3. Развитие существующих направлений рекламы (издание рекламных буклетов, листовок и участие в выставках, ярмарках, увеличение числа новых направлений рекламной деятельности минимум до трех (реклама в сети Интернет, реклама в справочнике 2ГИС, наружная реклама в виде щитов)

Ключевыми процессами системы менеджмента качества (СМК), влияющими на достижение частных целей компании, представленных в табл. 2, являются следующие:

- управление финансовыми ресурсами организации;
- изучение и оценка удовлетворенности потребителей (взаимодействия с потребителем);
- планирование и контроль исполнения заказов;
- производство;
- управление производственной средой;
- мониторинг и измерение продукции.

Параметры для оценки эффективности процессов СМК приведены в табл. 3.

Параметры для оценки эффективности процессов СМК

Наименование процесса	Параметры для оценки эффективности процессов
1	2
Управление финансовыми ресурсами организации	<p>1. Отсутствие срывов производственного характера, в связи с несвоевременной оплатой за материалы, выполненные работы, услуги и энергоносители:</p> $R_{\text{уфр}} = \frac{\text{Сумма, фактически выплаченная по заявкам от подразделений (тыс. руб.)}}{\text{Сумма плановых бюджетных заявок от подразделений (тыс. руб.)}} \cdot 100\%$
Изучение и оценка удовлетворенности потребителей (взаимодействие с потребителем)	<p>1. Результативность запросов, т.е. показатель по объему заключаемых договоров:</p> $R_{\text{уП1}} = \frac{E_{\text{стоимости продукции по заключенным договорам}}}{E_{\text{общей стоимости продукции по обработанным запросам}}} \cdot 100\%$ <p>2. Выполнение договорных сроков:</p> $R_{\text{уП2}} = \frac{E_{\text{стоимости продукции, поставленной в договорные сроки}}}{E_{\text{общей стоимости поставленной продукции}}} \cdot 100\%$ <p>3. Степень удовлетворенности потребителя:</p> $R_3 = \frac{\sum U_n}{n} \cdot 100\% ,$ <p>где <math>U_n</math> – удовлетворенность потребителей по каждому письму/опросному листу (%); <math>n</math> – количество опросных листов от потребителей</p>
Планирование и контроль исполнения заказов	<p>1. Отсутствие срывов планируемых сроков графика исполнения заказов (ГИЗ)</p> <p>Фактические численные значения критерия определяются по формуле</p> $O_c = \frac{\text{Количество ГИЗ без срывов планируемых сроков}}{\text{Общее количество ГИЗ за период}} \cdot 100\%$
Производство	<p>1. Выполнение плана по объему выпуска товарной продукции</p> <p>Фактическое значение результативности определяется по формуле</p> $R_{\text{ВП}} = \frac{V_{\text{ф}}}{V_{\text{п}}} \cdot 100\% ,$ <p>где <math>V_{\text{ф}}</math> – фактический объем выпуска товарной продукции, тыс. руб.;  <math>V_{\text{п}}</math> – плановый объем выпуска товарной продукции, тыс. руб.</p> <p>2. Своевременность изготовления продукции</p> <p>Данные по критерию за отчетный период вычисляются по формуле</p> $R_{\text{СИП}} = 100 - \frac{C}{V_{\text{п}}} \cdot 100\% ,$ <p>где <math>V_{\text{п}}</math> – плановый объем выпуска товарной продукции, тыс. руб.;  <math>C</math> – стоимость заказов, по которым произошел срыв изготовления, тыс. руб.</p>

1	2
	<p>3. Отсутствие внешних потерь Значение параметра находим по формуле</p> $\Xi_{\phi 1} = 100 - \frac{\Pi_{\text{внешн.}}}{V_{\phi}} \cdot 100\%,$ <p>где <math>\Pi_{\text{внешн.}}</math> – внешние потери на исправление несоответствий продукции, имеющей недостатки, тыс. руб.; <math>V_{\phi}</math> – объем товарного выпуска за отчетный период, тыс. руб.</p> <p>4. Отсутствие внутренних потерь Фактическое значение параметра определяется по формуле</p> $\Xi_{\phi 2} = 100 - \frac{\Pi_{\text{внутр.}}}{V_{\phi}} \cdot 100\%,$ <p>где <math>\Pi_{\text{внутр.}}</math> – внутренние потери, тыс. руб.; <math>V_{\phi}</math> – объем товарного выпуска за отчетный период, тыс. руб.</p>
Управление производственной средой	<p>1. Уровень условий труда Рассчитывается коэффициент КУТ по формуле</p> $\text{КУТ} = \frac{n_{\text{пр}}}{N_{\text{общ}}},$ <p>где <math>n_{\text{пр}}</math> – количество рабочих мест, на которых уровни ОВПФ* превышают ПДК** и ПДН***; <math>N_{\text{общ}}</math> – общее количество рабочих мест, на которых производились замеры уровней ОВПФ (за квартал, нарастающим итогом с начала года)</p> <p>2. Уровень травмобезопасности КТР:</p> $\text{КТР} = \frac{n_{\text{тр}}}{\text{Ч}_{\text{ср}}} \cdot 100\%,$ <p>где <math>n_{\text{тр}}</math> – количество несчастных случаев за отчетный период (квартал) нарастающим итогом с начала года, определяется по количеству оформленных актов формы Н-1; <math>\text{Ч}_{\text{ср}}</math> – среднесписочная численность работников</p>
Мониторинг и измерение продукции	<p>1. Сдача продукции ОТК с 1-го предъявления</p> $C_1 = \left( 1 - \frac{\text{Сумма всех возвратов, шт.}}{\text{Сумма всех предъявлений, шт.}} \right) \cdot 100\%$ <p>2. Отсутствие претензий от потребителя из-за недостоверности результатов контроля: Количество претензий от потребителя по вине ОТК, шт.</p> $O_{\text{п}} = 100 - \frac{\text{Количество претензий от потребителя по вине ОТК, шт.}}{\text{Количество единиц изготовленного оборудования, шт.}} \cdot 100\%$ <p>3. Отсутствие затрат на исправление брака по причине некачественного контроля: Сумма затрат на исправление брака (тыс. руб)</p> $O_3 = 100 - \frac{\text{Сумма затрат на исправление брака (тыс. руб)}}{\text{Общая стоимость изготовленного оборудования, (тыс. руб)}} \cdot 100\%$

П р и м е ч а н и е . ОВПФ\* – опасные и вредные производственные факторы; ПДК\*\* – предельно допустимая концентрация; ПДН\*\*\* – предельно допустимая норма.

Результаты оценки эффективности внедрения системы бережливого производства на ОАО «Пензхиммаш» приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Результаты оценки эффективности внедрения системы бережливого производства на ОАО «Пензхиммаш» за 4 кв. 2020 год

Показатели	До улучшений (П <sub>0</sub> )	Цели (П <sub>1</sub> )	Результаты (П <sub>2</sub> )	Весовой коэффициент*	Коэффициент достижения целей (К)
<b>Экономика</b>					
1. Отсутствие срывов производственного характера в связи с несвоевременной оплатой за материалы, выполненные работы, услуги и энергоносители	3	0	0	<b>0,20</b>	<b>1</b>
<b>Качество</b>				<b>0,21</b>	<b>0,82</b>
1. Уровень сдачи деталей и узлов ОТК с первого предъявления	85	99	96		0,96
2. Уровень сдачи изделия ОТК с первого предъявления	92	100	95		0,95
3. Отсутствие внешних претензий и рекламаций	1	0	0		1
4. Отсутствие потерь от брака, руб.	11944,86	0	5656,2		0
5. Отсутствие претензий от потребителя из-за недостоверности результатов контроля	0	0	0		1
6. Отсутствие затрат на исправление брака по причине некачественного контроля	0	0	0		1
<b>Производство</b>				<b>0,22</b>	<b>0,80</b>
1. Отсутствие срывов планируемых сроков графика исполнения заказов	3	0	0		1
2. Выполнение плана по объему выпуска товарной продукции, в % соотношении	95	не менее 100	100		1
3. Своевременность изготовления продукции	93,9	100	100		1
4. Отсутствие внешних потерь, руб.	0	0	0		1
5. Отсутствие внутренних потерь, руб.	11944,86	0	5656,20		0
<b>Безопасность</b>				<b>0,19</b>	<b>1,0</b>
1. Уровень условий труда	5	0	0		1
2. Уровень травмобезопасности	2	0	0		1
<b>Маркетинг</b>				<b>0,18</b>	<b>0,997</b>
1. Результативность запросов определяется	74,5	96,7	101,1		1
2. Выполнение договорных сроков	95,1	100	100		1
3. Степень удовлетворенности потребителя	94,9	100	98,9		0,99

\* – Весовые коэффициенты были рассчитаны экспертным методом.

$K=1$ ,  $\Pi_1 \leq \Pi_2$  – если значение результата достигает целевого значения или перевыполнено.

$K = \Pi_2/\Pi_1$  (в случае повышения показателя) и  $\Pi_1/\Pi_2$  (в случае снижения показателя),  $\Pi_0 \leq \Pi_2 < \Pi_1$  – если показатель в результате остается неизменным или не достигает целевого значения.

$$K_{рез} = 0,20 \cdot K_1 + 0,21 \cdot K_{2cp.} + 0,22 \cdot K_{3cp.} + 0,19 \cdot K_{4cp.} + 0,18 \cdot K_{5cp.}$$

$$K_{рез} = 0,20 \cdot 1 + 0,21 \cdot 0,82 + 0,22 \cdot 0,80 + 0,19 \cdot 1,0 + 0,18 \cdot 0,99 = 0,92.$$

Коэффициент общей результативности ниже 1,0, значит, руководству предприятия следует провести анализ причин по тем показателям, по которым не достигнуты результаты. Данный показатель – это «Отсутствие внутренних потерь». Акт о браке № 0102 от 12.12.2020 г. – недопустимые дефекты в продольном сварном соединении. Зам. директора по производству провел анализ показателя качества сварных соединений, указав, что основной процент брака получен при наплавке сварных швов. Причина – небрежность исполнителей. Корректирующие действия – депремирование исполнителей, назначение мастера по сварке в цехе из состава инженерно-технических работников.

Философия БП и СМК позволяет рассмотреть все указанные выше процессы СМК в рамках единого процесса создания ценности продукции, поскольку все они взаимосвязаны друг с другом. На сегодняшний день БП является потребностью промышленного производства, позволяющей обеспечивать конкурентоспособность выпускаемой продукции не только на внутреннем, но и на зарубежном рынке; поэтому внедрение стандартов «бережливого производства» в систему менеджмента позволяет свести все связанные с ними издержки и потери к минимуму, повысить уровень прибыли организации и добиться её стабильной работы и процветания в будущем.

#### Список литературы

1. Рабунец, П. Производственная система предприятия: как с помощью бережливого производства устранить потери и повысить эффективность / П. Рабунец. – URL: <http://www.leaninfo.ru/2011/11/17/lean-konferenciya-2011-itogi/>.
2. Бельш, К.В. Комплексный подход к внедрению и оценке результативности внедрения бережливого производства на промышленном предприятии / К.В. Бельш // Вестник УрФУ. Серия «Экономика и управление». – 2018. – Т.17, № 5. – С. 751–771.
3. Вумек, Д.П. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания компании: пер. с англ. / Д.П. Вумек, Д.Т. Джонс. – 2-е изд. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 473 с.
4. Масааки, И. Гемба кайдзен: Путь к снижению затрат и повышению качества: пер. с англ. / И. Масааки. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 346 с.
5. Маскелл, Б. Практика бережливого учета. Управленческий, финансовый учет и система отчетности на бережливых 146 предприятиях: пер. с англ. / Б. Маскелл, Б. Баггал. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2010. – 384 с.
6. Genaidy, A.M. Human performance in lean production environment: Critical assessment and research framework / A.M. Genaidy, W. Karwowski // Human Factors and Ergonomics in Manufacturing. – 2009. – Vol. 13, Issue 4. – P. 317–330.

#### References

1. Rabunets, P. The production system of an enterprise: how to eliminate losses and increase efficiency using lean production / P. Rabunets. – URL: <http://www.leaninfo.ru/2011/11/17/lean-konferenciya-2011-itogi/>.
2. Belysh, K.V. An integrated approach to the implementation and assessment of the effectiveness of the implementation of lean production at an industrial enterprise / K.V. Belysh // Bulletin of UrFU. Economics and Management Series. – 2018. – Vol. 17, No. 5. – P. 751–771.

3. Wumek, D.P. Lean production: How to get rid of losses and achieve the company's prosperity: trans. from english / D.P. Wumek, D.T. Jones. – 2nd ed. – М.: Alpina Business Books, 2005. – 473 p.

4. Masaaki, I. Gemba kaizen: The way to reduce costs and improve quality: trans. from english / I. Masaaki. – М.: Alpina Business Books, 2005. – 346 p.

5. Maskell, B. Practice of lean accounting. Management, financial accounting and reporting system at lean 146 enterprises: trans. from english / B. Maskell, B. Baggal. – М.: Institute for Comprehensive Strategic Studies, 2010. – 384 p.

6. Genaidy, A.M. Human performance in lean production environment: Critical assessment and research framework / A.M. Genaidy, W. Karwowski // Human Factors and Ergonomics in Manufacturing. – 2009. – Vol. 13, Issue 4. – P. 317–330.



# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.16

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

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

**Бикунова Марина Викторовна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

**Кошев Александр Николаевич,**  
доктор химических наук, профессор  
кафедры «Инженерно-вычислительные  
системы»  
E-mail: koshev@pguas.ru

**Малютина Татьяна Викторовна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Grishin Boris Mikhailovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Water Supply,  
Sewerage and Hydraulic Engineering»  
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

**Bikunova Marina Viktorovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»  
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

**Koshev Aleksander Nikolaevich,**  
Doctor of Chemistry Science, Professor of the  
department «Information and Computing  
Systems»  
E-mail: koshev@pguas.ru

**Malyutina Tatiana Viktorovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Water Supply, Sewerage and  
Hydraulic Engineering»

## ОЧИСТКА ВОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ИСТОЧНИКА С ПРИМЕНЕНИЕМ СМЕСЕВЫХ КОАГУЛЯНТОВ

Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, А.Н. Кошев, Т.В. Малютина

Приведены данные лабораторных исследований по эффективности действия смесевых коагулянтов на основе сернокислого алюминия, оксихлорида алюминия «АКВА-АУРАТ 30» и катионного органического коагулянта FL 45 при обработке сурской воды в период паводка. Увеличение времени перемешивания исходной воды со смесевыми коагулянтами с 2 до 10 минут улучшает качество её очистки по сравнению с применением минеральных коагулянтов. Наиболее значимые результаты по снижению мутности, цветности и перманганатной окисляемости речной воды после отстаивания и фильтрования были получены при использовании смесового коагулянта на основе сернокислого алюминия и органического полимера FL 45 с соотношением органической и минеральной частей, равным 1:4. При времени перемешивания с исходной речной водой 10 минут применение этого смесового коагулянта позволяет на 16-17 % снизить требуемые дозы сернокислого алюминия без ухудшения качества очищенной воды.

*Ключевые слова: природная вода, удаление примесей, смесевые коагулянты, отстаивание, фильтрование, эффективность очистки*

## SURFACE SOURCE WATER PURIFICATION USING MIXED COAGULANTS

B.M. Grishin, M. V. Bikunova, A. N. Koshev, T.V. Malytina

The data of laboratory studies on the effectiveness of mixed coagulants based on aluminum sulfate, aluminum oxychloride «AQUA-AURAT 30» and cationic organic coagulant FL 45, used for the treatment of Sura water during the flood period are given. An increase in the time of mixing the initial water with mixed coagulants from 2 to 10 minutes improves the quality of its purification in comparison with the use of mineral coagulants. The most significant results on reducing turbidity, color and permanganate oxidizability of river water after sedimentation and filtration were obtained using a mixed coagulant based on aluminum sulfate and FL 45 with a ratio of organic and mineral parts equal to 1:4. At a mixing time with the initial river water of 10 minutes, the use of this mixed coagulant allows to reduce the required doses of aluminum sulfate by 16-17 % without deteriorating the quality of purified water.

*Keywords: natural water, removal of impurities, mixed coagulants, sedimentation, filtration, purification efficienc*

Наиболее распространённым коагулянтом, используемым на многих водоочистных станциях России, работающих на речной воде, является сернокислый алюминий (СА). При введении в обрабатываемую воду данный реагент в результате гидролиза образует нерастворимую (в виде хлопьев) гидроокись алюминия  $Al(OH)_3$ , обладающую коагулирующим действием по отношению к гетерофазным примесям природной воды.

Опыт эксплуатации очистных сооружений водопроводных станций показал, что при низких температурах природной воды (осень, зима, паводок) гидролиз сернокислого алюминия и последующая коагуляция примесей происходят замедленно, что приводит к ухудшению качества очистки последующим отстаиванием и фильтрованием [1]. Для ускорения процесса коагуляции примесей могут быть использованы различные реагентные и безреагентные методы, оказывающие физическое или химическое воздействие на агрегаты скоагулированных частиц. Кроме того, в последние годы появились новые минеральные и органические коагулянты, которые в ряде случаев с успехом используются в качестве альтернативы СА. Однако эти коагулянты имеют более высокую стоимость по сравнению с сернокислым алюминием, и одним из экономически выгодных вариантов является использование смесевых органоминеральных коагулирующих композиций. Экспериментальные исследования смесевых реагентов показали их высокую эффективность при удалении мутности и цветности природной воды за счёт синергетического эффекта, возникающего между неорганическими и органическими коагулянтами [2].

В качестве смесевых коагулянтов для очистки воды от дисперсных примесей могут быть использованы реагентные композиции на основе оксихлорида алюминия (ОХА) и органических коагулянтов серии FLOQUAT<sup>TM</sup> французской фирмы СНФ [2, 3]. Практический интерес представляет также применение смесевых коагулянтов на основе СА и органических реагентов FLOQUAT<sup>TM</sup>.

Целью исследований, результаты которых приведены в данной статье, являлось сравнение эффективности использования различных модификаций смесевых органоминеральных коагулянтов при реагентной обработке и последующей двухступенчатой очистке природной воды поверхностного источника с повышенной мутностью и цветностью.

Объектом исследований являлась вода Сурского водохранилища в период паводка. Основные показатели качества исходной речной воды были следующие:

- температура – 1,8–2,5<sup>0</sup>С;
- мутность – 51–53 мг/л;
- щёлочность – 1,5–1,52 ммоль/л;
- цветность – 36–37 град;
- перманганатная окисляемость – 7,4–7,9 мгО<sub>2</sub>/л;
- рН – 7,65–7,84.

В качестве базовых реагентов для приготовления смесевых коагулянтов использовались:

- сернокислый алюминий в виде 10 %-го раствора с содержанием окиси алюминия в товарном продукте 16 %;
- оксихлорид алюминия «АКВА-АУРАТ 30» в виде 10 %-го раствора с содержанием окиси алюминия в товарном продукте 30 %;
- органический катионный коагулянт FL 45 серии «FLOQUAT» с очень высокой плотностью заряда в виде геля.

Концентрация активного вещества PolyDADMAC в коагулянте FL 45 достигала 20 %, молекулярная масса реагента была в пределах  $3 \cdot 10^5$ .

В экспериментах использовались 4 вида смесевых органоминеральных коагулирующих композиций, характеристики которых представлены в таблице.

Составы смесевых коагулянтов, используемых в экспериментах

Номера смесевых коагулянтов	Доля минерального коагулянта	Доза органического коагулянта
K1	80 % СА	20 % FL 45
K2	50 % СА	50 % FL 45
K3	80 % ОХА	20 % FL 45
K4	50 % ОХА	50 % FL 45

Программа лабораторных испытаний предусматривала обработку проб исходной речной воды исследуемыми коагулянтами при значениях градиента скорости перемешивания лабораторной мешалкой  $G=180 \text{ с}^{-1}$ . В первой серии экспериментов время перемешивания коагулянтов с водой составляло 2 мин, во второй серии – 10 минут. Затем во все исследуемые пробы воды добавлялся флокулянт – полиакриламид (ПАА), время его перемешивания с водой составляло 3 мин при градиенте скорости  $G=20 \text{ с}^{-1}$ . После осуществления реагентной обработки пробы речной воды переливались в стеклянные цилиндры ёмкостью 1 л каждый и отстаивались в течение 1 ч. Далее пробы осветлённой воды забирались из верхних частей цилиндров и фильтровались через бумажные фильтры «синяя лента».

Эффективность осветления природной воды, обработанной коагулянтами K1-K4, сравнивалась во всех сериях экспериментов с эффективностью осветления, полученной при использовании в качестве коагулянтов только СА и ОХА.

Дозы коагулянтов в экспериментах варьировались от 30 до 50 мг/л, а доза ПАА была одинакова и составляла 0,1 мг/л. Качество осветлённой воды после её реагентной обработки оценивалось по показателям мутности (после отстаивания и фильтрования), цветности и перманганатной окисляемости (после фильтрования). Кроме того, в каждой серии экспериментов определялись величины рН фильтрата.

Графики остаточной мутности отстоянной воды, обработанной смесевыми коагулянтами и сернокислым алюминием при различном времени перемешивания исходной воды с реагентами, показаны на рис. 1 и 2.

При времени перемешивания исходной речной воды с коагулянтами  $t_n=2$  мин наиболее значимое снижение её мутности после отстаивания  $M_0$  наблюдалось при использовании смесевых коагулянтов K1 и K2 с дозой  $D_k=50$  мг/л (9,7 и 11,2 мг/л соответственно, см. рис. 1). Применение данных коагулянтов обеспечило более высокую эффективность отстаивания по сравнению с коагулянтом СА (остаточная мутность  $M_0=13,2$  мг/л), который является основным реагентом на водопроводных очистных сооружениях г. Пензы. Аналогичный результат был получен при использовании коагулянта ОХА и смесевых коагулянтов на его основе. Остаточная мутность отстоянной воды  $M_0$  для коагулянтов K3 и K4 с дозой 50 мг/л составляла соответственно 22,4 и 23,8 мг/л, тогда как при использовании коагулянта ОХА «АКВА-АУРАТ 30» мутность обработанной речной воды после отстаивания при  $D_k=50$  мг/л была равна  $M_0=25,8$  мг/л. Следует также отметить, что порог коагуляции

для реагентов СА и ОХА наблюдался при дозе  $D_k=40$  мг/л, тогда как при использовании смесевых коагулянтов он начинался с дозы  $D_k=35$  мг/л. Кроме того, улучшение эффекта очистки воды от взвешенных веществ для коагулянтов К1-К4 при дозах  $D_k > 45$  мг/л практически не происходило в отличие от минеральных коагулянтов СА и ОХА.

При увеличении времени перемешивания коагулянтов с речной водой до  $t_n=10$  мин применение смесевых коагулянтов во всех сериях экспериментов дало более высокую эффективность отстаивания по сравнению с минеральными коагулянтами (см. рис. 2). Наименьшие значения мутности отстоянной воды вновь наблюдались при использовании смесевых коагулянтов К1 и К2 с дозой 50 мг/л ( $M_0$  соответственно 6,5 и 9,0 мг/л). Введение коагулянтов К3 и К4 с той же дозой обеспечило снижение содержания взвеси в исходной воде до 18,8 и 21,5 мг/л. Минеральные коагулянты, введенные в обрабатываемую воду с дозами  $D_k > 40$  мг/л, дали результаты хуже, чем в первой серии экспериментов ( $M_0=22,8$  мг/л для СА и  $M_0=35,0$  мг/л для ОХА). Ухудшение эффекта осветления при использовании растворов СА и ОХА во второй серии экспериментов может быть обосновано разными механизмами процесса агломерации примесей при использовании минеральных и органических коагулянтов.

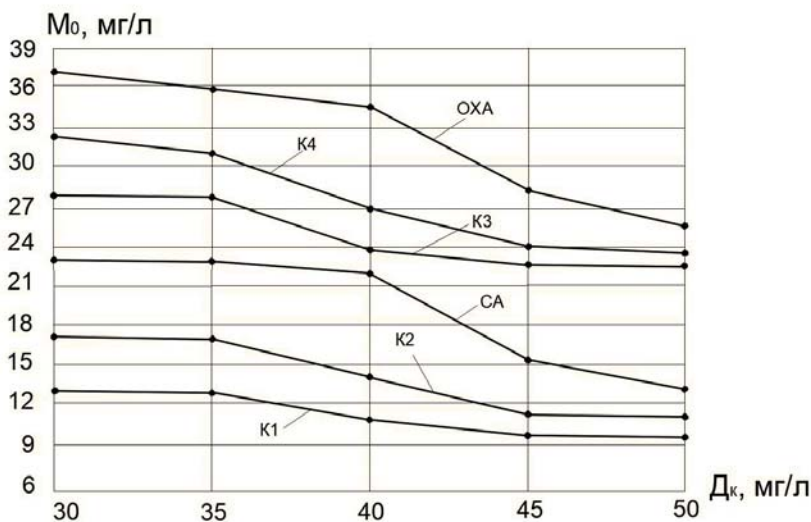


Рис. 1. Графики зависимостей мутности отстоянной воды  $M_0$  от доз коагулянтов при времени перемешивания исходной воды с коагулянтами  $t_n=2$  мин

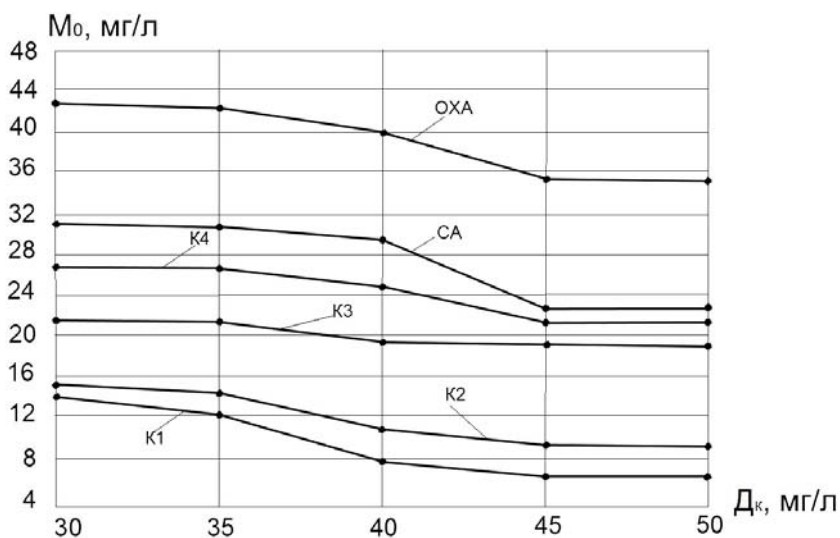


Рис. 2. Графики зависимостей мутности отстоянной воды  $M_0$  от доз коагулянтов при времени перемешивания исходной воды с коагулянтами  $t_n=10$  мин

Если процесс гидролиза солей алюминия происходит практически мгновенно с образованием нерастворимой гидроокиси алюминия  $Al(OH)_3$ , обладающей адсорбционными свойствами по отношению к примесям, то при введении в воду органических коагулянтов, имеющих длинномерные молекулы, необходимо длительное время для их равномерного распределения во всём объёме обрабатываемой воды и проявления в полной мере их коагулирующих свойств, заключающихся в образовании полимерных «мостиков» [3]. При длительном перемешивании воды с частицами  $Al(OH)_3$  происходит их разрушение с образованием мелких, плохо оседающих хлопьев, дающих низкое качество осветления воды осаждением [4, 5].

Анализ экспериментальных зависимостей, показанных на рис. 1 и 2, позволяет сделать вывод о том, что наибольший эффект удаления взвешенных примесей отстаиванием наблюдается при использовании смесевых коагулянтов К1 и К2. Дозы смесевых коагулянтов К1 и К2 при времени перемешивания  $t_n=10$  мин могут быть снижены в 1,5–1,6 раза по сравнению с дозой СА без ухудшения качества осветления воды отстаиванием.

На рис. 3 и 4 изображены графики зависимостей остаточной мутности фильтрата от доз смесевых и минеральных коагулянтов для первой и второй серий экспериментов. Как и в случае отстаивания воды, наименьшие значения остаточной мутности были достигнуты при использовании смесевых коагулянтов на основе СА и FL 45. Для коагулянтов К1 и СА в первой серии экспериментов остаточная мутность фильтрата  $M_{\phi}$  была равна соответственно 0,6 и 0,72 мг/л при  $D_k > 40$  мг/л (см. рис. 3), во второй серии экспериментов для этих же коагулянтов значения  $M_{\phi}$  составляли соответственно 0,5 и 1,68 мг/л (см. рис. 4). Значения  $M_{\phi}$  при использовании ОХА, а также смесевых коагулянтов на его основе были выше и варьировались от 1,2 до 1,5 мг/л при  $D_k > 40$  мг/л и времени перемешивания коагулянтов с исходной речной водой  $t_n=2$  мин, а при  $t_n=10$  мин остаточные концентрации взвеси в фильтрате изменялись от 0,8 до 2,1 мг/л. Так же, как и в экспериментах с отстаиванием, увеличение времени перемешивания минеральных коагулянтов с водой с 2 до 10 минут привело к ухудшению качества фильтрата, а для смесевых коагулянтов, наоборот, к его улучшению. Однако необходимо отметить, что увеличение времени перемешивания до 10 мин в экспериментах с органическими коагулянтами не привело к существенному улучшению эффекта осветления воды фильтрованием по сравнению с применением минерального коагулянта СА при  $t_n=2$  мин.

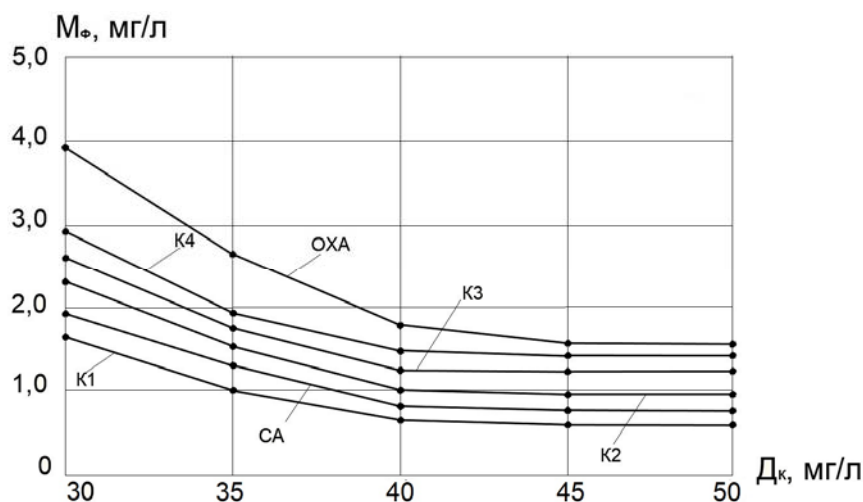


Рис. 3. Графики зависимостей остаточной мутности фильтрата ( $M_{\phi}$ ) от доз коагулянтов при времени перемешивания исходной воды с коагулянтами  $t_n=2$  мин

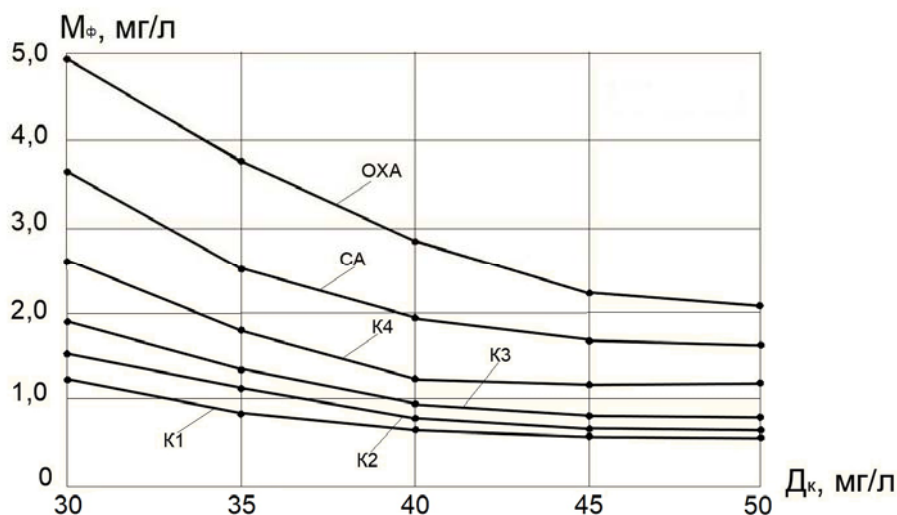


Рис. 4. Графики зависимостей остаточной мутности фильтрата ( $M_f$ ) от доз коагулянтов при времени перемешивания исходной воды с коагулянтами  $t_n=10$  мин

Требуемая по СанПиН 2.1.4.1074-01 мутность питьевой воды, равная или меньшая 1,5 мг/л, достигалась при использовании коагулянта К1 с дозой 30 мг/л и  $t_n=10$  мин (см. рис. 4), а при использовании СА требуемые значения мутности были получены при дозе 35 мг/л и времени перемешивания  $t_n=2$  мин (см. рис. 3). Таким образом, за счёт применения смесового коагулянта К1 требуемая доза СА может быть уменьшена на 16-17 % без ухудшения качества фильтрата.

Эксперименты по определению цветности (Ц) в пробах фильтрата показали, что для первой серии испытаний с  $t_n=2$  мин снижение цветности до уровня требований СанПиН 2.1.4.1074 -01 ( $C \leq 20$  град) достигалось при дозах коагулянтов СА, К1 и К2, равных 40 мг/л. Для коагулянтов ОХА, К3 и К4 требуемый для питьевой воды показатель цветности был получен при дозах 45-50 мг/л. Во второй серии экспериментов (при  $t_n=10$  мин) величина  $C \leq 20$  град была достигнута при использовании смесовых коагулянтов К1 и К2 с дозой 35 мг/л, а для остальных коагулянтов при дозах от 40 мг/л (для смесовых коагулянтов К3 и К4) до 45-50 мг/л (для СА и ОХА).

Анализы фильтрата по показателю перманганатной окисляемости (ПО) показали, что требуемая по СанПиН 2.1.4.1074-01 величина ПО, равная или меньшая 5 мг $O_2$ /л, в первой серии экспериментов (при  $t_n=2$  мин) была обеспечена при использовании коагулянтов СА и К1 с дозами не менее 40 мг/л, а для остальных коагулянтов – с дозами не менее 45 мг/л. Во второй серии экспериментов (при  $t_n=10$  мин) значения ПО воды, меньшие 5 мг $O_2$ /л, были получены для смесовых коагулянтов К1 и К2 с дозами от 40 мг/л, для смесовых коагулянтов К3 и К4 с дозами от 45 мг/л, а для коагулянтов СА и ОХА с дозами 50 мг/л.

Значения рН фильтрата во всех сериях экспериментов с применением смесовых коагулянтов снижались не так значительно, как в случае с использованием минеральных реагентов СА и ОХА. При применении минеральных коагулянтов с дозами выше 45 мг/л величины рН фильтрата составляли 6,5-6,61 для коагулянта СА и 5,8-6,0 для коагулянта ОХА «АКВА-АУРАТ 30». В экспериментах со смесовыми коагулянтами К1 и К2 значения рН фильтрата были равны 6,72–6,75 при  $D_k \geq 40$  мг/л, а для коагулянтов К3 и К4 значения рН составляли 6,28–6,32 при тех же дозах.

## ВЫВОДЫ

1. Применение смесовых органоминеральных коагулянтов на основе реагента FL 45 для обработки сурской воды в период паводка обеспечивает более высокий эффект удаления мутности, цветности и перманганатной окисляемости по сравнению с использованием только минеральных коагулянтов СА и ОХА с теми же дозами. Смесовые коагулянты с весовым соотношением органической и минеральной частей,

равным 1:4, для обеспечения высокого качества осветления воды являются предпочтительными по сравнению со смешевыми коагулянтами с соотношением органической и минеральной частей, равным 1:1.

2. Увеличение времени перемешивания воды с коагулянтами с 2 до 10 минут повышает эффективность действия смешевых коагулянтов. Дозы смешевых коагулянтов К1 и К2 при времени перемешивания 10 минут могут быть снижены в 1,5–1,6 раза по сравнению с дозой СА без ухудшения качества осветления воды отстаиванием, а качество фильтрата остаётся на том же уровне при использовании смешевого реагента К1 с дозой, на 16–17 % меньшей, по сравнению с дозой сернокислого алюминия, являющегося основным коагулянтом на водопроводных очистных сооружениях г. Пензы.

3. Проведённые эксперименты показали, что процесс коагуляции примесей сурской воды целесообразно исследовать в направлении поиска оптимальных весовых соотношений органической и минеральной частей в смешевых коагулянтах, а также нахождения рационального времени перемешивания исходной речной воды с органоминеральными коагулянтами и точек их ввода в обрабатываемую воду на очистных сооружениях.

### Список литературы

1. Драгинский, В.Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева, С.В. Гетманцев. – М.: Научное издание, 2005. – 576 с.
2. Привалова, Н.В. Повышение эффективности работы станций водоподготовки с использованием методов моделирования: монография / Н.В. Привалова, В.И. Алексеев, Б.М. Гришин, М.В. Бикунова. – Пенза: ПГУАС, 2017. – 136 с.
3. Гандурина, Л.В. Применение органических коагулянтов для осветления мутных вод / Л.В. Гандурина, Б.Н. Фрог, Е.В. Маштакова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – №7. – С. 11–16.
4. Yamuna, S.V. Application of low-mixing energy for the coagulation process / S.V. Yamuna, A.G.Graham // Water Research. – 2015. – No 84. – P. 333–341.
5. Yu, W.Z. Breakage and re-growth on flocs: effect of additional doses of coagulant species / W.Z. Yu, J. Gregory, L.C. Campos // Water Research. – 2011. – No 45. – P. 6718–6724.

### References

1. Draginskii, V.L. Coagulation in natural water treatment technology / V.L. Draginskii, L.P. Alekseeva, S.V. Getmantsev. – M.: Scientific publication, 2005. – 576 p.
2. Privalova, N.V. Improving the efficiency of water treatment plants using modeling methods: monograph / N.V. Privalova, V.I. Alekseev, B.M. Grishin, M.V. Bikunov. – Penza: PGUAS, 2017. – 136 p.
3. Gandurina, L.V. Application of organic coagulants for clarification of turbid waters / L.V. Gandurina, B.N. Frog, E.V. Mashtakova // Water supply and sanitary engineering. – 2020. – No. 7. – S. 11-16.
4. Yamuna, S.V. Application of low-mixing energy for the coagulation process / S.V. Yamuna, A.G.Graham // Water Research. – 2015. – No 84. – P. 333–341.
5. Yu, W.Z. Breakage and re-growth on flocs: effect of additional doses of coagulant species / W.Z. Yu, J. Gregory, L.C. Campos // Water Research. – 2011. – No 45. – P. 6718–6724.

УДК 628.3

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Андреев Сергей Юрьевич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

*Самарский государственный технический университет*

Россия, 443100, Самара  
ул. Молодогвардейская, 244,  
тел.: 8 (846) 278-43-11

**Степанов Сергей Валерьевич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение и  
водоотведение»  
E-mail: stepanovsv3@yandex.ru

*Акционерное общество «Научно-  
производственное предприятие "Рубин"»*

Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,  
тел.: +7-8412-20-48-08

**Князев Владимир Александрович**,  
кандидат технических наук,  
инженер 1-й категории

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Andreev Sergey Yuryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Water supply, sewerage and  
hydraulic engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Shein Aleksander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
Department «Mechanics»  
E-mail: shein-ai@yandex.ru

*Samara State Technical University*

Russia, 443100, Samara,  
244, Molodogvardeyskaya St.,  
tel: 8 (846) 278-43-11

**Stepanov Sergei Valerievich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Water supply and sewerage  
engineering»  
E-mail: stepanovsv3@yandex.ru

*Joint Stock Company «Research And  
Production Enterprise "Rubin"»*

Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,  
tel: + 7-8412-20-48-08

**Knyazev Vladimir Aleksandrovich**,  
Candidate of Sciences,  
1st Category Engineer

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА НАПОРНОЙ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ВОЗДУХА В САТУРАТОРЕ

С.Ю. Андреев, А.И. Шейн, С.В. Степанов, В.А. Князев

Приведены результаты теоретических исследований процесса напорной флотационной очистки сточных вод. Показано, что с увеличением давления в сатураторе более  $P_p = 5 \cdot 10^6$  Па, эффективность процесса безреагентной напорной флотационной очистки замасоченных сточных вод в горизонтальном флотоотстойнике снижается вследствие увеличения среднего диаметра пузырьков воздуха, образующихся из перенасыщенного раствора. Установлено, что повысить эффект флотационной очистки сточных вод можно за счет повышения степени турбулизации водовоздушной смеси в объеме сатуратора. Получены математические зависимости, описывающие процесс растворения воздуха в сатураторе. Использование предложенной методики расчета позволит оптимизировать процесс напорной флотационной очистки сточных вод.

*Ключевые слова: концентрация насыщения, перенасыщенный раствор, коэффициент степени насыщения, процесс массопередачи, объемный коэффициент массопередачи, пленочный коэффициент массопередачи, пузырек воздуха, напорная флотация*



## THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF PRESSURE FLOTATION WASTEWATER TREATMENT BY INCREASING THE EFFICIENCY OF AIR DISSOLUTION IN SATURATOR

S.Yu. Andreev, A.I. Shein, S.V. Stepanov, V.A. Knyazev

The results of theoretical studies of the process of pressure flotation wastewater treatment are presented. It is shown that with an increase in the pressure in the saturator more, the efficiency of the process of non-reactive pressure flotation treatment of contaminated wastewater in a horizontal flotation tank decreases, due to an increase in the average diameter of air bubbles formed from a supersaturated solution. It is established that it is possible to increase the effect of flotation wastewater treatment by increasing the degree of turbulence of the water-air mixture in the volume of the saturator. Mathematical dependences describing the process of air dissolution in the saturator are obtained. The use of the proposed calculation method will optimize the process of pressure flotation wastewater treatment.

*Keywords: saturation concentration, supersaturated solution, saturation coefficient, mass transfer process, volume mass transfer coefficient, film mass transfer coefficient, air bubble dissolved air flotation*

В настоящее время для очистки производственных сточных вод широко используется метод флотации.

Флотация – процесс извлечения из воды загрязняющих частиц, происходящий в результате их молекулярного прилипания к поверхности раздела фаз вода-воздух, обусловленный наличием избыточной свободной энергии на поверхности слоев.

Как технологический процесс флотация впервые стала использоваться более 100 лет назад в горнорудной промышленности для обогащения руд.

Закрепление дисперсной частицы на поверхности пузырька в водной среде протекает в результате физико-химического взаимодействия трех фаз (вода, воздух, поверхность частицы) и определяется явлениями смачивания. Смачивающая способность жидкости зависит от степени ее полярности.

Прилипание дисперсной частицы к поверхности пузырька воздуха в воде возможно только в случае его гидрофобности, когда наблюдается плохое смачивание вещества частицы водой. Чем выше степень гидрофобности поверхности дисперсных частиц извлекаемых загрязнений, тем выше вероятность их закрепления на пузырьках воздуха. Гидрофильные дисперсные частицы, как правило, не флотируются пузырьками воздуха. Высокий эффект флотационной очистки сточных вод наблюдается при извлечении таких гидрофобных примесей, как нефть, нефтепродукты, жиры, масла, поверхностно активные вещества. В этих случаях поверхностное натяжение воды на границе раздела фаз не превышает величины  $\sigma = 0,060 - 0,065$  н/м.

Большое значение в процессе флотационной очистки сточных вод имеет размер образующихся пузырьков воздуха, их количество и степень равномерности их распределения во флотационном объеме.

Наиболее мелкие пузырьки воздуха, имеющие диаметр 20–100 мкм, позволяет получить метод напорной флотации, предусматривающий выделение газа из перенасыщенного раствора воздуха в воде, образующегося вследствие понижения давления [1].

До величины давления  $P = 3 \cdot 10^9$  Па растворимость воздуха в воде выражается законом Генри, в соответствии с которым максимально возможное количество растворенного в воде газа (концентрация насыщения)  $C_k$ , кг/м<sup>3</sup>, пропорционально его парциальному давлению над раствором [2]:

$$C_{np} = K_G \cdot P, \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

где  $C_{np}$  – концентрация насыщения газа, кг/м<sup>3</sup> (максимальная растворимость в воде при давлении  $P$ , Па);  $K_G$  – коэффициент пропорциональности (коэффициент Генри), кг/Па·м<sup>3</sup>.

Из (1) имеем

$$C_{\text{нр}} = C_{\text{на}} \frac{P}{P_a}, \text{ кг/м}^3, \quad (2)$$

где  $C_{\text{на}}$  – максимальная растворимость газа в воде при атмосферном давлении;  $P_a$  – атмосферное давление,  $P_a = 0,1 \cdot 10^6$  Па.

В таблице представлены значения растворимости воздуха в воде при атмосферном давлении  $P_a = 0,1 \cdot 10^6$  Па в зависимости от температуры.

Температура $t$ , °С	Растворимость в воде при $P_a = 0,1 \cdot 10^6$ Па, $C_{\text{на}}$ кг/м <sup>3</sup> (г/л)	Температура $t$ , °С	Растворимость в воде при $P_a = 0,1 \cdot 10^6$ Па, $C_{\text{на}}$ кг/м <sup>3</sup> (г/л)
10	0,0292	40	0,0170
20	0,0236	50	0,0147
30	0,0199	60	0,0127

Основными элементами схемы напорной флотационной очистки сточных вод являются напорный резервуар (сатуратор), предназначенный для насыщения обрабатываемых сточных вод воздухом, и флотационный резервуар (флотатор), предназначенный для формирования флотоагрегатов «извлекаемая дисперсная частица – пузырек воздуха» и выделения их из сточных вод.

При флотационной очистке, как правило, используется схема, предусматривающая насыщение всего потока очищаемых сточных вод воздухом в сатураторе с последующим сбросом повышенного давления в дросселирующем устройстве и подачу образовавшейся водовоздушной смеси во флотатор, либо циркуляционная схема, предусматривающая забор части очищенных сточных вод и насыщение рециркуляционного потока воздухом в сатураторе, сброс повышенного давления с последующим смешением образовавшейся водовоздушной смеси с основным потоком очищаемых сточных вод и подачу их во флотатор.

Теоретическое уравнение газового баланса в процессе прямоточной напорной флотации позволяет определить удельное количество воздуха, выделяющегося из одного кубического метра перенасыщенного раствора  $\Delta C$ , кг/м<sup>3</sup>, при сбросе давления с  $P$  до  $P_a$ , Па.

$$C_{\text{нр}} = C_{\text{на}} + \Delta C, \text{ кг/м}^3, \quad (3)$$

откуда

$$\Delta C = C_{\text{нр}} - C_{\text{на}}, \text{ кг/м}^3. \quad (4)$$

В реальности в сатураторе не происходит полного насыщения обрабатываемых сточных вод воздухом, а концентрация растворенного воздуха имеет величину

$$C_{\text{р.в}} = K_n C_{\text{нр}}, \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

где  $K_n$  – коэффициент степени насыщения сточных вод воздухом в сатураторе.

В этом случае уравнение (4) запишется в виде

$$\Delta C = K_n C_{\text{нр}} - C_{\text{на}}, \text{ кг/м}^3. \quad (6)$$

Скорость насыщения сточных вод воздухом в сатураторе  $\frac{dC}{dt}$  определяется уравнением

$$\frac{dC}{dt} = K_w (C_{\text{нр}} - C), \text{ кг/м}^3, \quad (7)$$

где  $K_w$  – объемный коэффициент массопередачи воздуха,  $\text{с}^{-1}$ ;  $C$  – концентрация воздуха в воде в момент времени  $t$ ,  $\text{кг/м}^3$ .

Выполняя преобразования уравнения (7) и интегрируя его в интервале времени в пределах от 0 до  $T_c$  и в интервале изменения концентрации воздуха в воде в пределах от  $C_0$  до  $C_T$ , можно получить уравнение

$$K_w = \frac{1}{T} \ln \frac{C_{\text{нр}} - C_0}{C_{\text{нр}} - C_T}, \text{ с}^{-1}. \quad (8)$$

С учетом того, что  $C_T = C_{\text{рв}} = K_n C_{\text{нр}}$ , формула (8) запишется в виде

$$K_w = \frac{1}{T_c} \ln \frac{C_{\text{нр}} - C_0}{C_{\text{нр}}(1 - K_n)}, \text{ с}^{-1}. \quad (9)$$

При сбросе давления в дросселирующем устройстве с  $P$  до  $P_a$ , Па, раствор воздуха становится перенасыщенным и из него выделяются пузырьки воздуха, в результате чего образуется граница раздела фаз «воздух – вода». Процесс фазового перехода, сопровождающийся возникновением дисперсной системы, протекает в результате изменения величины энергии Гиббса. В этом случае под изменением энергии Гиббса  $\Delta G$ , Дж, понимается максимальная величина работы системы, складывающаяся из работы образования объема новой фазы  $A_{\text{об}}$  и работы образования новой поверхности раздела фаз  $A_{\text{пов}}$ :

$$\Delta G = A_{\text{пов}} + A_{\text{об}} = \Delta G_{\text{пов}} - \Delta \mu, \text{ Дж}, \quad (10)$$

где  $\Delta G_{\text{пов}}$  – изменение энергии Гиббса при изменении величины площади поверхности раздела фаз «вода – воздух», Дж;  $\Delta \mu$  – изменение химического потенциала системы при фазовом переходе, Дж.

При образовании единичного пузырька воздуха происходит изменение величины энергии Гиббса  $\Delta G_n$ , Дж

$$\Delta G_n = \sigma_n S_n - \Delta \mu \frac{W_n}{W_\mu}, \text{ Дж}, \quad (11)$$

где  $\sigma_n$  – коэффициент поверхностного натяжения границы раздела фаз «вода – воздух», Дж/м<sup>2</sup>;  $S_n$  – площадь поверхности пузырька воздуха, м<sup>2</sup>;  $W_n$  – объем пузырька воздуха, м<sup>3</sup>;  $W_\mu$  – объем одного моля воздуха, м<sup>3</sup>.

Учитывая, что для пузырька воздуха сферической формы

$$S_n = 4\pi \cdot r_n^2, \text{ м}^2, \quad (12)$$

$$W_n = \frac{4}{3} \pi \cdot r_n^3, \text{ м}^3, \quad (13)$$

где  $r_n$  – диаметр пузырька воздуха, м.

Формула (11) может быть записана в виде

$$\Delta\sigma_{\text{п}} = 4\pi \left( r_{\text{п}}^2 \sigma_{\text{п}} - \frac{\Delta\mu \cdot r_{\text{п}}^3}{W_{\mu}} \right), \text{ Дж.} \quad (14)$$

При снижении давления раствора воздуха в воде с  $P$  (давления, при котором происходит процесс насыщения воды воздухом в сатураторе) до давления  $P_{\text{а}}$  (давления после дросселирующего устройства) раствор становится перенасыщенным, при этом величина изменения химического потенциала системы составит

$$\Delta\mu = RT \ln \frac{P}{P_{\text{а}}}, \text{ Дж,} \quad (15)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{град} \cdot \text{К}}$ ;  $T$  – абсолютная температура раствора, град·К.

Взяв первую и вторую производные по  $r_{\text{п}}$  из уравнения (14), получим, что функция  $\sigma_{\text{п}}$  будет иметь максимум, при некотором значении  $r_{\text{п.кр}}$ , равном

$$r_{\text{п.кр}} = \frac{2\sigma_{\text{п}} \cdot W_{\mu}}{\Delta\mu}, \text{ м.} \quad (16)$$

При величинах  $P = 0,5 \cdot 10^9$  Па,  $P_{\text{а}} = 0,1 \cdot 10^9$  Па и  $T = 293$  К  $\Delta\mu$  будет иметь значение

$$\Delta\mu = 8,31 \cdot 293 \cdot \ln \frac{0,5 \cdot 10^9}{0,1 \cdot 10^9} = 3919 \text{ Дж.} \quad (17)$$

Критическое значение радиуса зародыша пузырька воздуха, образовавшегося из перемешенного раствора, при  $\sigma_{\text{п}} = 0,073$  Дж/м<sup>2</sup> и  $W_{\mu} = 0,024$  м<sup>3</sup> будет иметь величину

$$r_{\text{п.кр}} = \frac{2 \cdot 0,073 \cdot 0,024}{3919} = 0,9 \cdot 10^6 \text{ м} \approx 1 \text{ мкм.} \quad (18)$$

При условии, что радиус образовавшегося зародыша пузырька воздуха  $r_{\text{п}}$  меньше критического значения  $r_{\text{п.кр}} = 1$  мкм, процесс роста пузырька потребует увеличения энергии  $\sigma_{\text{п}}$ , и образовавшийся зародыш растворится в воде.

Условием выделения из жидкой фазы пересыщенного раствора газообразной фазы, кроме превышения химического потенциала выделяющегося вещества в старой фазе над его химическим потенциалом в новой фазе, является наличие дополнительной поверхностной энергии границы раздела фаз.

Для образования новой фазы из пересыщенного раствора необходимо, чтобы из-за самопроизвольных флюктуаций произошло скопление в одном месте достаточно большого числа молекул новой фазы, что, как правило, происходит на микровключениях, служащих центрами образования, аналогичных центрам конденсации или кристаллизации.

После образования устойчивого зародыша пузырька воздуха он в результате молекулярной диффузии воздуха из раствора начинает расти до того момента, пока перенасыщение не исчезнет.

Таким образом, процесс выделения новой фазы из пересыщенного раствора состоит из двух стадий:

- 1) возникновение зародышей пузырьков воздуха;
- 2) рост образовавшихся зародышей пузырьков воздуха.

Первая из этих стадий требует увеличения энергии Гиббса и вследствие этого термодинамически затруднена. Вторая стадия протекает самопроизвольно со значительным убыванием энергии Гиббса.

Поскольку первая стадия выделения новой фазы из пересыщенного раствора затруднена, число образовавшихся в объеме жидкости зародышей пузырьков воздуха ограничено, и с ростом пересыщения жидкости величина диаметра образующихся пузырьков газа имеет тенденцию к увеличению.

На рис. 1 представлены полученные В.Н. Покровским графики распределения размеров пузырьков азота в воде, образующихся при различной степени пересыщения раствора.

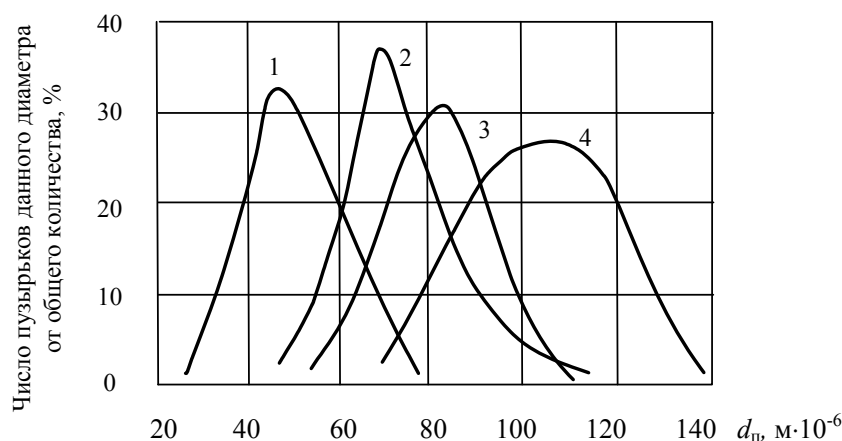


Рис. 1. Графики распределения размеров пузырьков азота в воде, образующихся при различной степени пересыщения раствора:

- 1 – пересыщение 200 %; 2 – пересыщение 400 %; 3 – пересыщение 500 %;  
4 – пересыщение 800 %

Из рис. 1 следует, что распределение размеров пузырьков азота при всех значениях пересыщения раствора близко к нормальному. Среднестатистические размеры образующихся пузырьков азота с увеличением пересыщения раствора увеличиваются. С ростом величины пересыщения раствора наблюдается расширение спектра дисперсности образующихся пузырьков.

Эффективность процесса флотационной очистки сточных вод зависит от величины газонаполнения флотационного объема  $\varphi$  и среднего диаметра образующихся пузырьков воздуха  $d_{п}$ , м. С уменьшением величины среднего диаметра образующихся пузырьков воздуха вероятность образования флотокомплекса «удаляемая дисперсная частица – пузырек воздуха» увеличивается, что обуславливает повышение эффекта флотационной очистки. Повышение величины газонаполнения флотационного объема  $\varphi$  приводит к увеличению объемной концентрации газовой фазы и к росту общей поверхности раздела фаз «вода – воздух», что также увеличивает эффект флотационной очистки.

При увеличении значения пересыщения раствора, с одной стороны, происходит повышение величины газонаполнения флотационного объема  $\varphi$ , что обуславливает повышение эффекта очистки. С другой стороны, наблюдается увеличение среднего диаметра образующихся пузырьков воздуха, что способствует снижению вероятности образования флотокомплексов.

Противоположное влияние этих факторов приводит к тому, что максимальный эффект флотационной очистки наблюдается при некотором значении пересыщения раствора.

О снижении эффективности процесса безреагентной флотационной очистки замазученных сточных вод в горизонтальном флотоотстойнике при увеличении давления в сатураторе более  $4,0 \text{ кгс/см}^2$  свидетельствует полученный В.Н. Покровским график, представленный на рис. 2.

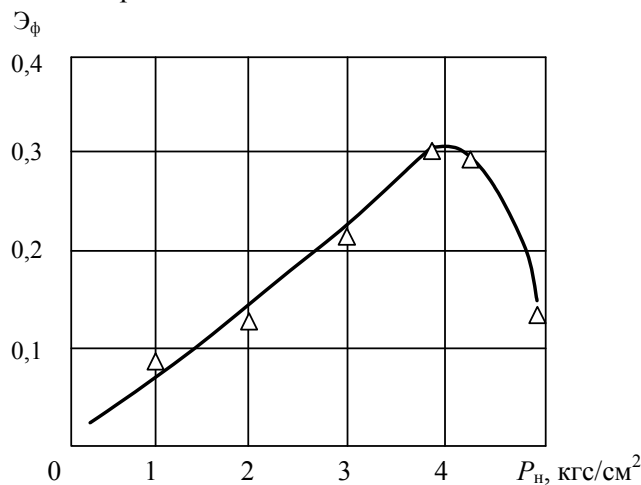


Рис. 2. Зависимость эффективности безреагентной флотационной очистки в горизонтальном флотоотстойнике  $\Delta\phi$ , %, от давления в сатураторе  $P_n$ , кгс/см<sup>2</sup>

Величина удельного газонаполнения водовоздушной смеси, образующейся во флотаторе из перенасыщенного раствора, может быть определена по формуле

$$\phi = \frac{W_r}{W_{\text{ж}} + W_r} = \frac{\Delta C / \rho_{\text{в}}}{1000 + \Delta C / \rho_{\text{в}}}, \quad (19)$$

где  $W_{\text{ж}}$  и  $W_r$  – соответственно удельные объемы жидкой и газовой фаз в водовоздушной смеси ( $W_{\text{ж}} = 1000 \text{ л/м}^3$ ) при давлении в сатураторе  $P_p$ , Па;  $\rho_{\text{в}} = 0,0012 \text{ кг/л}$  – удельная плотность воздуха при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  и давлении  $P_a = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па}$ .

В соответствии с рекомендациями академика С.В. Яковлева удельное количество воздуха в водовоздушной смеси в объеме флотатора при флотационной очистке производственных сточных вод может быть определено по формуле

$$\Delta C = C_3 \cdot q_y \cdot \rho_{\text{в}}, \text{ кг/м}^3, \quad (20)$$

где  $C_3$  – концентрация загрязнений в очищаемых сточных водах, кг/м<sup>3</sup>;  $q_y$  – удельный объем воздуха, необходимый для флотирования 1 кг загрязнений,  $q_y = 15 \text{ л/кг}$ .

При концентрации загрязняющих веществ в очищаемых сточных водах  $C_3 = 5 \text{ кг/м}^3$  водовоздушная смесь в объеме флотатора должна содержать удельное количество воздуха

$$\Delta C = 5 \cdot 15 \cdot 0,0012 = 0,090 \text{ кг/м}^3. \quad (21)$$

В этом случае газонаполнение водовоздушной смеси в объеме флотатора будет иметь величину

$$\phi = \frac{0,09 / 0,012}{1000 + 0,09 / 0,012} = 0,07. \quad (22)$$

При величине абсолютного давления в сатураторе  $P_a = 0,6 \cdot 10^6$  Па концентрация насыщения воды воздухом будет иметь значение  $P_a = 0,024 \frac{0,6 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 10^6} = 0,144$  кг/м<sup>3</sup>, и для обеспечения удельного количества воздуха в водовоздушной смеси  $C_3 = 0,090$  кг/м<sup>3</sup> коэффициент насыщения воды воздухом в сатураторе должен иметь величину

$$K_n = \frac{C_{на} + \Delta C}{C_{нр}} = \frac{0,024 + 0,090}{0,144} = 0,79. \quad (23)$$

Значение объемного коэффициента массопередачи воздуха при продолжительности насыщения воды в сатураторе  $T_c = 3$  мин = 180 с и концентрации воздуха в поступающих в сатуратор сточных водах  $C_0 = 0,005$  кг/м<sup>3</sup> составит

$$K_n = \frac{1}{180} \ln \frac{0,144 + 0,005}{0,144(1 - 0,79)} = 0,0085 \text{ с}^{-1} = 31 \text{ с}^{-1}. \quad (24)$$

Величина избыточного манометрического давления в сатураторе составит

$$P_c = P - P_a = 0,6 \cdot 10^6 - 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} = 0,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \approx 5 \text{ кгс/м}^2. \quad (25)$$

В соответствии с данными, представленными на рис. 2, при снижении давления в сатураторе с  $P_c = 5,0$  кгс/м<sup>2</sup> до  $P_c = 4,0$  кгс/м<sup>2</sup> эффективность безреагентной флотационной очистки замазученных сточных вод в горизонтальном флотоотстойнике может быть увеличена с  $\Theta = 11\%$  до  $\Theta = 30\%$ .

В этом случае для сохранения значений величин удельного количества воздуха, выделяющегося из одного кубического метра перенасыщенного раствора  $\Delta C = 0,09$  кг/м<sup>3</sup> и газонаполнения водовоздушной смеси  $\varphi = 0,07$  при концентрации насыщения воды воздухом  $C_{нр} = 0,024 \frac{0,5 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 10^6} = 0,12$  кг/м<sup>3</sup> величина коэффициента насыщения воды воздухом должна быть увеличена до значения

$$K_n = \frac{0,024 + 0,090}{0,12} = 0,95. \quad (26)$$

Для этого необходимо либо увеличить продолжительность насыщения обрабатываемых сточных вод воздухом в сатураторе при неизменном значении  $K_w = 0,0085 \text{ с}^{-1}$  до

$$T_c = \frac{1}{K_w} \ln \frac{C_{нр} - C_0}{C_{нр}(1 - K_n)} = \frac{1}{0,0085} \ln \frac{0,120 - 0,005}{0,120(1 - 0,95)} = 347 \text{ с} \approx 6 \text{ мин}, \quad (27)$$

либо интенсифицировать процесс растворения воздуха в сатураторе и при неизменной продолжительности процесса массопередачи  $T_c = 3$  мин = 180 с повысить значение объемного коэффициента массопередачи воздуха до

$$K_w = \frac{1}{T_c} \ln \frac{C_{нр} - C_0}{C_{нр}(1 - K_n)} = \frac{1}{180} \ln \frac{0,120 - 0,005}{0,120(1 - 0,95)} = 0,0164 \text{ с}^{-1} = 59 \text{ с}^{-1}. \quad (28)$$

Величина объемного коэффициента массопередачи воздуха в воду в сатураторе может быть определена по формуле

$$K_w = K_L \frac{A}{W_{жс}}, \text{ с}^{-1}, \quad (29)$$

где  $K_L$  – коэффициент массопередачи поверхности раздела фаз «воздух – вода» в водовоздушной смеси в сатураторе (пленочный коэффициент массопередачи), м/с;

$A$  – площадь межфазового контакта в водовоздушной смеси в сатураторе,  $\text{м}^2$ ;  $W_{\text{жс}}$  – объем жидкости в сатураторе,  $\text{м}^3$ .

Объем жидкости в водовоздушной смеси в сатураторе может быть определен по формуле

$$W_{\text{жс}} = W_c(1 - \varphi_c), \text{ м}^3, \quad (30)$$

где  $W_c$  – объем сатуратора,  $\text{м}^3$ ;  $\varphi_c$  – газонаполнение водовоздушной смеси в сатураторе.

Объем газа (воздуха) в водовоздушной смеси в сатураторе может быть определен по формуле

$$W_{\text{г.с}} = W_c \cdot \varphi_c, \text{ м}^3. \quad (31)$$

С учетом изменения величины плотности воздуха  $\rho_v$  в сатураторе величина газонаполнения водовоздушной смеси при давлении  $P_p = 0,6 \cdot 10^6 \text{ Па}$  будет иметь значение

$$\varphi_c = \frac{\frac{\Delta C}{\rho_v} \cdot \frac{P_a}{P_p}}{1000 + \frac{\Delta C}{\rho_v} \cdot \frac{P_a}{P_p}} = \frac{0,09 / 0,0012 \cdot 0,1 \cdot 10^6 / 0,6 \cdot 10^6}{1000 + 0,09 / 0,0012 \cdot 0,1 \cdot 10^6 / 0,6 \cdot 10^6} = 0,012. \quad (32)$$

Величина газонаполнения водовоздушной смеси при давлении  $P_p = 0,6 \cdot 10^6 \text{ Па}$  будет иметь значение

$$\varphi_c = \frac{0,09 / 0,0012 \cdot 0,1 \cdot 10^6 / 0,5 \cdot 10^6}{1000 + 0,09 / 0,0012 \cdot 0,1 \cdot 10^6 / 0,5 \cdot 10^6} = 0,015. \quad (33)$$

Принимая допущение о том, что все пузырьки воздуха в водовоздушной смеси имеют сферическую форму и средний диаметр  $d_n$ , величина площади межфазового контакта в сатураторе может быть определена как

$$A = S_n N_n = \pi d_n^2 N_n, \text{ м}^2, \quad (34)$$

где  $S_n = \pi d_n^2$  – площадь поверхности одного пузырька воздуха,  $\text{м}^2/\text{шт.}$ ;  $N_n$  – число пузырьков воздуха в водовоздушной смеси в объеме сатуратора, шт.

Число пузырьков воздуха в водовоздушной смеси в объеме сатуратора может быть определено как

$$N_n = \frac{W_{\text{г.с}}}{W_n} = \frac{W_c \cdot \varphi_c}{W_n}, \text{ м}^2, \quad (35)$$

где  $W_n$  – объем одного пузырька воздуха,  $\text{м}^3$ .

С учетом

$$W_n = \frac{\pi d_n^3}{6}, \text{ м}^3, \quad (36)$$

формула (33) запишется в виде

$$N_n = \frac{6W_c \varphi_c}{\pi d_n^3}, \text{ шт.} \quad (37)$$



Подставляя формулы (37), (34) и (30) в формулу (29), получим

$$K_w = K_L \pi d_n^3 \frac{6W_c \varphi_c}{\pi d_n^3 W_c (1 - \varphi_c)} = 6 \frac{K_L}{d_n} \frac{\varphi_c}{1 - \varphi_c}, \text{ с}^{-1}. \quad (38)$$

Из формулы (36) следует, что интенсифицировать процесс массопередачи воздуха в воду в объеме сатуратора возможно за счет

1) увеличения значения коэффициента массопередачи поверхности раздела фаз «воздух – вода»  $K_L$ , м/с. Увеличить пленочный коэффициент массопередачи  $K_L$  можно за счет повышения интенсивности перемешивания водовоздушной смеси в объеме сатуратора;

2) уменьшения среднего диаметра пузырьков воздуха  $d_n$ , м в водовоздушной смеси в объеме сатуратора. Повышение интенсивности перемешивания водовоздушной смеси в объеме сатуратора позволит не только увеличить значение пленочного коэффициента массопередачи  $K_L$ , но и уменьшить средний диаметр пузырьков воздуха  $d_n$ , в результате чего возрастет поверхность межфазового контакта в сатураторе  $A$ ;

3) повышения величины удельного газонаполнения водовоздушной смеси в объеме сатуратора  $\varphi$ . Повышение удельного газонаполнения водовоздушной смеси в сатураторе также позволит увеличить площадь контакта газовой и жидкой фаз в объеме сатуратора  $A$  и за счет этого интенсифицировать процесс массопередачи воздуха в воду.

#### Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Теоретические основы процесса массопередачи в объеме динамической двухфазной смеси «вода – воздух» / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3. – С. 152–159.
2. Андреев, С.Ю. Оценка эффекта истощения газовой фазы в процессе массопередачи в двухфазной системе «жидкость – газ» / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, Н.Н. Ласьков, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С. 158–165.

#### References

1. Andreev, S.Yu. Theoretical foundations of the mass transfer process in the volume of a dynamic two-phase mixture «water – air» / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 3. – P. 152–159.
2. Andreev, S.Yu. Assessment of the effect of gas phase depletion in the process of mass transfer in a two-phase «liquid – gas system» / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, N.N. Laskov, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4. – P. 158–165.

УДК 628.3

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Андреев Сергей Юрьевич,**доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»

E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Ласьков Николай Николаевич,**доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru*Самарский государственный технический университет*Россия, 443100, Самара  
ул. Молодогвардейская, 244,  
тел.: 8 (846) 278-43-11**Степанов Сергей Валерьевич,**доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение и  
водоотведение»

E-mail: stepanovsv3@yandex.ru

*Акционерное общество «Научно-  
производственное предприятие "Рубин"»*Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,  
тел.: +7-8412-20-48-08**Князев Владимир Александрович,**кандидат технических наук,  
инженер 1-й категории*Penza State University of Architecture  
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Andreev Sergey Yuryevich,**Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Water supply, sewerage and  
hydraulic engineering»

E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Laskov Nikolay Nikolaevich,**Doctor of Sciences, Professor, Head  
of the department «Building structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru*Samara State Technical University*Russia, 443100, Samara,  
244, Molodogvardeyskaya St.,  
tel: 8 (846) 278-43-11**Stepanov Sergei Valerievich,**Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Water supply and sewerage  
engineering»

E-mail: stepanovsv3@yandex.ru

*Joint Stock Company «Research And  
Production Enterprise "Rubin"»*Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,  
tel: + 7-8412-20-48-08**Knyazev Vladimir Aleksandrovich,**Candidate of Sciences,  
1st Category Engineer

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛОТАЦИОННОГО УДАЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ТОНКОСЛОЙНОГО ОТСТАИВАНИЯ И УВЕЛИЧЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КРУПНОСТИ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ФЛОТОКОМПЛЕКСОВ

С.Ю. Андреев, Н.Н. Ласьков, С.В. Степанов, В.А. Князев

Приведены результаты теоретических исследований процессов флотационного удаления дисперсных загрязнений из сточных вод. Рассмотрена математическая модель процесса флотационной очистки, описывающая кинетику процессов перехода загрязняющей дисперсной частицы из исходного состояния в флотокомплекс «частица – пузырек» и перехода образовавшегося флотокомплекса в пенный слой. Показано, что процесс флотационного удаления дисперсных загрязнений может быть существенно интенсифицирован за счет использования технологических приемов тонкослойного

отстаивания и увеличения гидравлической крупности образующихся флотокомплексов. Предложено повышать величину гидравлической крупности флотокомплексов за счет вторичного насыщения флотационного объема пузырьками воздуха размерами  $d_{п} = 0,02 - 0,04$  мм. Установлено, что получить водовоздушную смесь требуемого дисперсного состава можно при обработке потока водовоздушной смеси в кольцевом пространстве между двумя соосно расположенными цилиндрами при величине гидравлического радиуса  $R = 0,0125$  м и значении критерия Рейнольдса для поперечной составляющей скорости потока  $Re = 100000$ .

*Ключевые слова:* флотокомплекс, напорная флотация, тонкослойное отстаивание, гидравлическая крупность, турбулентные пульсации, масштаб турбулентности, диссипация энергии

## THEORETICAL ANALYSIS OF THE POSSIBILITY TO INCREASE THE EFFICIENCY OF FLOTATION TO REMOVE PARTICULATE CONTAMINANTS THROUGH THE USE OF TECHNOLOGICAL METHODS OF THIN-LAYER SEDIMENTATION AND INCREASE IN HYDRAULIC SIZE OF RESULTING FLOTATION COMPLEXES

S.Yu. Andreev, N.N. Laskov, S.V. Stepanov, V.A. Knyazev

The results of theoretical studies of the processes of flotation removal of dispersed contaminants from wastewater are presented. The mathematical model of the flotation process describing the kinetics of the processes of transition pollutants disperse particles from the initial state to fluoroplex «particle – bubble» and transition photocouplers formed in the foam layer is presented. It is shown that the process of flotation removal of dispersed contaminants can be significantly intensified by using technological techniques of thin-layer sedimentation and increasing the hydraulic fineness of the resulting flotation complexes. It is proposed to increase the value of the hydraulic fineness of flotation complexes due to the secondary saturation of the flotation volume with air bubbles in size  $d_{п} = 0,02 - 0,04$  mm. It is established that it is possible to obtain the required air-water mixture dispersing composition with Abbott flow water-air mixture in the annular space between two coaxially arranged cylinders when the value of the hydraulic radius is  $R = 0,0125$  m and the value of the Reynolds criterion for transverse velocity component of the flow is  $Re = 100000$ .

*Keywords:* flotation complex, pressure flotation, velocity constant, thin-layer sedimentation, hydraulic fineness, turbulent pulsations, turbulence scale, energy dissipation

В практике очистки производственных сточных вод в настоящее время получил широкое распространение метод напорной флотации. Дальнейшее совершенствование этого метода невозможно без разработки и развития теоретических основ процесса флотационного удаления дисперсных загрязнений сточных вод.

Для оценки количественных и качественных характеристик такого сложного физико-химического процесса, как флотационное удаление дисперсных загрязнений сточных вод, может быть использован метод математического моделирования, базирующийся на стратегии системного анализа [1, 2].

Процесс очистки сточных вод методом напорной флотации состоит из трех основных стадий:

- образование флотокомплекса «пузырек воздуха – дисперсная частица»;
- всплывание образовавшегося флотокомплекса на поверхность жидкости;
- формирование на поверхности жидкости пенного слоя.

Математическое описание процесса флотационного удаления из сточных вод дисперсных частиц, представляющее собой систему уравнений, характеризующую переход дисперсных частиц из исходного состояния (состояния *A*) в состояние флотокомплекса «дисперсная частица – пузырек воздуха» (состояние *B*) и далее в состояние частицы в пенном слое на поверхности жидкости (состояние *C*), было разработано Б.С. Ксенофоновым.

Система уравнений (1) предполагает, что на каждой стадии возможны обратные переходы:

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt} = -K_1 \cdot C_A + K_2 \cdot C_B - K_6 \cdot C_C \\ \frac{dC_B}{dt} = K_1 \cdot C_A - K_2 \cdot C_B - K_3 \cdot C_B + K_4 \cdot C_C, \text{ кг/м}^3, \\ \frac{dC_C}{dt} = K_3 \cdot C_B - K_4 \cdot C_C - K_5 \cdot C_C + K_6 \cdot C_A \end{cases} \quad (1)$$

где  $\frac{dC_A}{dt}$ ;  $\frac{dC_B}{dt}$ ;  $\frac{dC_C}{dt}$  – соответственно удельные скорости изменения концентраций дисперсных частиц, находящихся в виде: взвешенных частиц; флотокомплексов «дисперсная частица – пузырек воздуха»; пенного слоя на поверхности жидкости, кг/м<sup>3</sup>·с;  $C_A$ ;  $C_B$ ;  $C_C$  – соответственно концентрации дисперсных частиц, находящихся в виде: взвешенных частиц; флотокомплексов «дисперсная частица – пузырек воздуха»; пенного слоя на поверхности жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$ ;  $K_4$ ;  $K_5$ ;  $K_6$  – константы скорости перехода соответственно из состояния  $A$  в состояние  $B$ ; из состояния  $B$  в состояние  $A$ ; из состояния  $B$  в состояние  $C$ ; из состояния  $C$  в состояние  $B$ ; из состояния  $C$  в состояние  $A$ ; из состояния  $A$  в состояние  $C$ , с<sup>-1</sup>.

В диссертационной работе Н.Н. Рулева приводится следующая формула, описывающая величину константы скорости извлечения дисперсных частиц в процессе флотации монодисперсных систем (константы  $K_1$ ):

$$K_1 = \frac{3 q_b \cdot E}{2 d_n}, \text{ с}^{-1}, \quad (2)$$

где  $q_b$  – объем воздуха, проходящего в единицу времени через единицу поперечного сечения флотационного объема, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с;  $d_n$  – величина среднего диаметра пузырьков воздуха во флотационном объеме, м;  $E$  – коэффициент эффективности захвата флотируемой частицы пузырьком воздуха.

В соответствии с рекомендациями Н.Н. Рулева величина коэффициента эффективности захвата флотируемой частицы пузырьком воздуха для стоковского режима всплывания пузырька ( $d_n \leq 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $v_n \leq 0,14$  м/с) может быть определена как

$$E = \frac{3}{2} \left( \frac{d_r}{d_n} \right)^2, \quad (3)$$

где  $d_r$  – диаметр дисперсной частицы, м,

а при условии  $d_n > 0,5 \cdot 10^{-3}$  м и  $v_n > 0,14$  м/с как

$$E = \frac{3 d_r}{2 d_n}. \quad (4)$$

Константа  $K_2$  характеризует прочность образовавшегося флотокомплекса, и ее величина зависит от концентрации флотокомплексов  $C_B$  во флотационном объеме, степени турбулентности флотационного объема, средней продолжительности пребывания флотокомплексов во флотационном объеме.

Величину константы  $K_3$ , характеризующую скорость перехода флотокомплексов в пенный слой, можно определить по формуле

$$K_3 = K_3 \frac{v_\phi}{H_\phi}, \text{ с}^{-1}, \quad (5)$$

где  $K_3$  – эмпирический коэффициент;  $v_\phi$  – скорость всплывания флотокомплекса «дисперсная частица – пузырек воздуха», м/с;  $H_\phi$  – глубина зоны флотации, м.

Как правило, размер пузырьков воздуха, образующихся в процессе напорной флотации, составляет  $d_n = 0,02 \cdot 10^{-3} - 0,05 \cdot 10^{-3}$  м, что позволяет обеспечить высокую удельную скорость перехода дисперсных загрязняющих частиц в форму флотокомплексов  $\frac{dC_A}{dt}$ , кг/м<sup>3</sup>

Уменьшая глубину зоны флотации  $H_\phi$ , можно в соответствии с формулой (5) увеличить значение константы скорости перехода флотокомплекса в пенный слой  $K_3$  и за счет этого понизить концентрацию флотокомплексов во флотационном объеме  $C_B$ , кг/м<sup>3</sup>.

Уменьшение концентрации флотокомплексов во флотационном объеме  $C_B$  позволит снизить интенсивность процесса обратного перехода дисперсных частиц из состояния  $B$  в состояние  $A$ , что позволит повысить эффективность флотационной очистки сточных вод.

Уменьшить глубину зоны флотации  $H_\phi$  можно за счет использования тонкослойных элементов (ламель). Флотаторы, использующие принцип отделения воздушных пузырьков в тонком слое жидкости, получили название тонкослойных.

В случае, когда очищенные сточные воды, содержащие водовоздушную смесь, пропускаются между наклонными пластинами, пузырьки воздуха всплывают вертикально до верхней пластины. Одновременно с этим очищаемая жидкость движется вдоль пластины вниз, что позволяет создать относительное движение сточных вод и пузырьков воздуха, близкое к противоточному. Режим противоточного движения способствует высокой эффективности захвата загрязняющих дисперсных частиц пузырьками воздуха, в результате чего достигается высокий эффект очистки сточных вод. Поток пузырьков воздуха поднимается по наклонной линии вдоль верхней пластины, не встречает сопротивления движущегося вдоль нижней пластины потока воды, в результате чего процесс разделения двух потоков происходит гораздо интенсивней.

На рис. 1 изображена схема противоточного движения потоков пузырьков воздуха и очищаемых сточных вод в процессе традиционной (а) и ламельной (б) флотации.

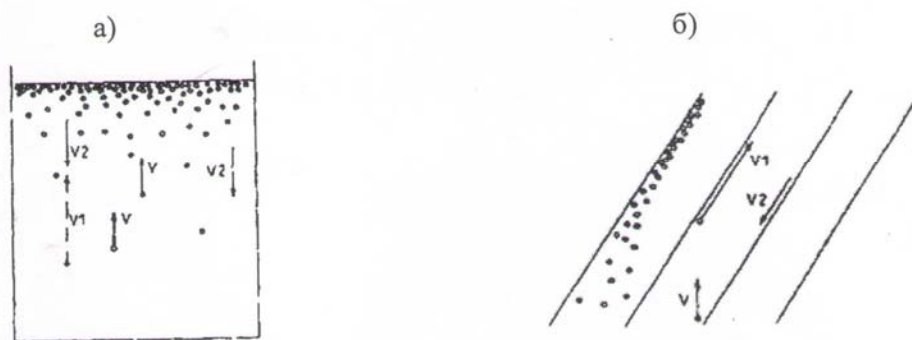


Рис. 1. Направление движения потоков пузырьков воздуха и очищаемых сточных вод в процессе традиционной (а) и ламельной (б) флотации:

$v$  – результирующая скорость всплывания образовавшихся флотокомплексов;  $v_1$  – скорость всплывания пузырьков воздуха;  $v_2$  – скорость движения сточных вод

Большой вклад в развитие ламельной флотации внесла международная компания Kwi International GmbH, являющаяся мировым лидером в производстве и поставке оборудования для флотационной очистки природных и сточных вод.

Концерн Kwi был образован в 1957 году на базе компании Kraft Engineering Company, создавшей свой напорный флотатор, предназначенный для очистки производственных сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности еще в 1947 году.

Ламельная технология Mega cell концерна Kwi использует как проточное, так и противоточное движение потоков в одном пакете ламелей. Сочетание проточного и противоточного движения потоков достигается за счет использования технологического приема отбора осветленных сточных вод в нижней точке между двумя ветвями V-образных ламелей. На первой стадии флотационной очистки поток очищаемых сточных вод движется сонаправлено с всплывающими пузырьками воздуха в пространстве, образованном между соседними V-образными ламелями, в результате чего скорость потока всплывающих пузырьков воздуха не тормозится потоком очищаемой жидкости.

В слое жидкости над пакетом ламелей образовавшиеся флотокомплексы и пузырьки воздуха продолжают движение к поверхности жидкости, а осветляемые сточные воды движутся вниз в пространство между V-образными ламелями, увлекая вслед за собой мелкодисперсные пузырьки воздуха и оставшиеся частицы загрязнений. На второй стадии флотационной очистки отделение оставшихся дисперсных загрязнений происходит по противоточной схеме. В отличие от традиционных флотаторов, использующих противоточную схему, в технологии Mega cell пространство над пакетом ламелей занято только потоком всплывающих флотокомплексов и пузырьков воздуха, которые не испытывают сильных напряжений, возникающих вследствие противотока очищаемых сточных вод.

Поступающие на очистку сточные воды и водовоздушная смесь распределяются по всей длине флотатора через специальные распределительные трубы, имеющие переменную площадь сечения и установленные под пакетом ламелей (рис. 2).

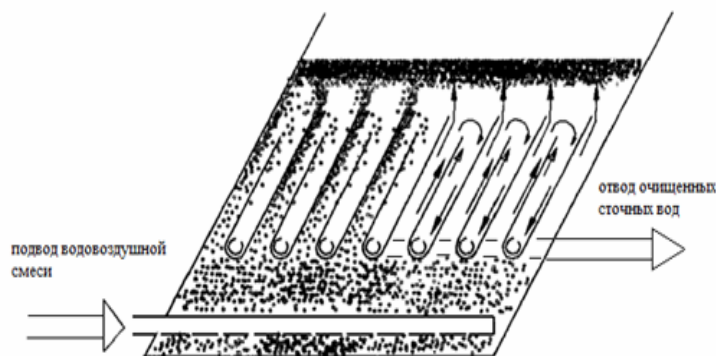


Рис. 2. Принципиальная схема ламельной технологии Mega cell компании Kwi

Осветленная вода выводится через отводные патрубки, расположенные в нижней части V-образных ламелей, соединенные с общим отводным коллектором, расположенным сбоку флотатора. Флотошлам удаляется либо спиральным сборником, либо подводится скребковым механизмом к шламовой камере и удаляется в нее лопастным механизмом. Максимальная пропускная способность одной V-образной ламели составляет  $12,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что эквивалентно гидравлической нагрузке  $30 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Запатентованная конструкция V-образной ламели позволяет существенно сократить расход рециркуляционного потока очищенных сточных вод, забираемого из флотатора, что позволяет уменьшить энергопотребление рециркуляционного насоса и снизить себестоимость процесса флотационной очистки.

В соответствии с формулой (5) увеличить скорость перехода образовавшегося флотокомплекса в пенный слой (величину константы  $K_3$ ) можно не только уменьшая

значение глубины зоны флотации  $H_{\phi}$ , м, но и повышая скорость всплывания флотокомплекса «дисперсная частица – пузырек воздуха»  $v_{\phi}$ , м/с.

Вероятность образования флотокомплексов с пузырьками воздуха малых размеров порядка  $d_{\text{п}} = 0,02 \cdot 10^{-3} - d_{\text{п}} = 0,04 \cdot 10^{-3}$  м имеет высокое значение, вследствие чего обеспечивается требуемая величина удельной скорости перехода загрязняющих частиц в форму флотокомплекса  $\frac{dC_A}{dt}$ , кг/м<sup>3</sup>·с. При этом флотирование образующихся флотоагрегатов на поверхность жидкости является процессом, протекающим чрезвычайно медленно, поскольку скорость всплывания флотокомплексов существенно меньше величины  $v_{\phi} = 1 \cdot 10^{-3}$ , м/с. Значительно ускорить процесс флотирования образовавшихся флотокомплексов позволит технологический прием вторичного насыщения флотатора пузырьками воздуха с размерами  $d_{\text{п}} = 0,2 - 0,5$  мм, имеющими скорость всплывания  $v_{\phi} = 0,022 - 0,139$ , м/с, в результате чего произойдет коалесценция (слипание) мелких пузырьков в существующих флотокомплексах с крупными пузырьками воздуха и увеличение гидравлической крупности образовавшихся вторичных флотокомплексов.

Вторичное насыщение флотируемой среды пузырьками воздуха не должно вызывать чрезмерной турбулизации в объеме флотатора, так как это может привести к разрушению образовавшихся флотокомплексов и увеличению константы  $K_2$ . Пузырьки воздуха, имеющие диаметр более  $d_{\text{п}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м, всплывают в турбулентном режиме. Траектория их всплывания отличается от прямолинейной и имеет вид сплюсненной эллиптической спирали с тенденцией к увеличению диаметра ее витка по мере подъема пузырька воздуха. Спиралевидная траектория всплывания крупных пузырьков воздуха существенно турбулизует водовоздушную смесь во флотационном объеме.

Размер пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, используемой для вторичной флотационной обработки очищаемых сточных вод, не должен превышать величины  $d_{\text{п}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Получить водовоздушную смесь с пузырьками требуемого размера можно в процессе ее диспергирования под действием турбулентных пульсаций скорости, действующих на поток водовоздушной смеси, имеющей вращательно-поступательное движение в кольцевом пространстве между двумя соосно расположенными цилиндрами диаметрами  $D$ , м и  $D + 2b$ , м (рис. 3).

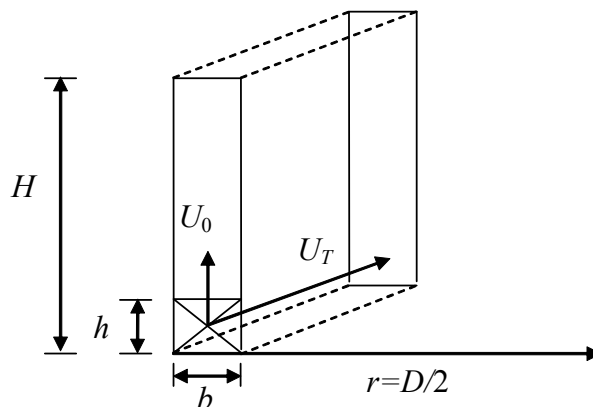


Рис. 3. Схема вращательно-поступательного движения водовоздушного потока в кольцевом пространстве, образованном между двумя соосно расположенными цилиндрами

Поток водовоздушной смеси, имеющей расход  $Q = 11,5$  м<sup>3</sup>, поступает в щель высотой  $h = 0,06$  м и шириной  $b = 0,025$  м в кольцевом пространстве между двумя

цилиндрами, имеющими диаметры  $D = 0,40$  м и  $D + 2b = 0,40 + 2 \cdot 0,025 = 0,45$  м и высоту  $H = 1,2$  м.

Площадь горизонтального сечения кольцевого пространства

$$F_2 = \frac{\pi}{4} [(D + 2b)^2 - D^2] = \frac{3,14}{4} [(0,4 + 2 \cdot 0,025)^2 - 0,4^2] = 0,033 \text{ м}^2. \quad (7)$$

Площадь вертикального сечения кольцевого пространства

$$F_b = H \cdot b = 1,2 \cdot 0,025 = 0,03 \text{ м}^2. \quad (8)$$

Площадь вертикального сечения щели

$$F_{щ} = h \cdot b = 0,06 \cdot 0,025 = 0,0015 \text{ м}^2. \quad (9)$$

Величина осевой скорости потока водовоздушной смеси в кольцевом пространстве

$$U_0 = \frac{Q_c}{3600 F_2} = \frac{11,5}{3600 \cdot 0,033} = 0,097 \approx 0,1 \text{ м/с}. \quad (10)$$

Величина окружной (тангенциальной) скорости потока водовоздушной смеси в щели кольцевого пространства

$$U_T = \frac{Q_c}{3600 F_{щ}} = \frac{11,5}{3600 \cdot 0,0019} = 2,1 \text{ м/с}. \quad (11)$$

Величина гидравлического радиуса вертикального сечения кольцевого пространства

$$R_b = \frac{F_b}{\chi_b} = \frac{H \cdot b}{2H} = \frac{b}{2} = \frac{0,025}{2} = 0,0125 \text{ м}, \quad (12)$$

где  $\chi_b = 2H$  – смоченный периметр вертикального сечения кольцевого пространства.

Величина гидравлического радиуса вертикального сечения щели

$$R_{щ} = \frac{F_{щ}}{\chi_{щ}} = \frac{h \cdot b}{2h} = \frac{b}{2} = \frac{0,025}{2} = 0,0125 \text{ м}. \quad (13)$$

Величина гидравлического радиуса горизонтального сечения кольцевого пространства

$$R_2 = \frac{F_2}{\chi_2} = \frac{\pi}{4} [(D + 2b)^2 - D^2] \frac{1}{\pi(D + 2b) - \pi D} = \frac{0,033}{3,14(0,4 + 2 \cdot 0,025) + 3,14 \cdot 0,4} = 0,0124 \text{ м}. \quad (14)$$

Эквивалентные диаметры вертикального сечения щели горизонтального сечения кольцевого пространства будут иметь значения

$$d_{эщ} = 4R_{щ} = 4 \cdot 0,0125 = 0,05 \text{ м}; \quad (15)$$

$$d_{э2} = 4R_2 = 4 \cdot 0,0124 \approx 0,0496 = 0,05 \text{ м}. \quad (16)$$

Величина критерия Рейнольдса для тангенциальной (поперечной) составляющей скорости движения водовоздушного потока в кольцевом пространстве

$$Re_T = \frac{U_T \cdot d_{эщ}}{\nu} = \frac{2,1 \cdot 0,05}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 103960, \quad (17)$$

где  $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематический коэффициент вязкости воды при  $T = 20^\circ\text{C}$ .



Величина критерия Рейнольдса для продольной (осевой) составляющей скорости движения водовоздушного потока в кольцевом пространстве

$$\text{Re}_o = \frac{U_o \cdot d_{\text{э2}}}{\nu} = \frac{0,1 \cdot 0,05}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 4950. \quad (18)$$

Величины  $\text{Re}_o = 4950$  и  $\text{Re}_o = 103960$  превышают критическое значение  $\text{Re}_{\text{кр}} = 2300$ , при достижении которого в пристеночных областях потока начинают формироваться макровихри – отдельные закрученные объемы жидкости, которые перемещаются к оси потока, в результате чего наблюдаются пульсации величин местных скоростей  $U'$ . Значения как продольных  $U'_o$ , так и поперечных составляющих  $U'_T$  мгновенных скоростей потока все время колеблются относительно их средних значений  $U_o$  и  $U_T$ .

$$\begin{cases} U'_o = U_o \pm \Delta U_o, \\ U'_T = U_T \pm \Delta U_T \end{cases}, \text{ м/с}, \quad (19)$$

где  $\Delta U_o$  и  $\Delta U_T$  – соответственно продольная и поперечная составляющие турбулентных пульсаций величин мгновенных значений местных скоростей потока, м/с.

Величины  $\Delta U_o$  и  $\Delta U_T$  зависят от значения коэффициента кинематической вязкости потока  $\nu$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , и величин удельных секундных диссипаций энергии потока обусловленных продольной  $U_o$  и поперечной  $U_T$  составляющими скорости  $\varepsilon_o$  и  $\varepsilon_T$ ,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ .

Ввиду малого значения газонаполнения водовоздушной смеси  $\varphi$  величина  $\nu$  принимается равной значению кинематического коэффициента вязкости воды

$$\nu = \nu_{\text{вод}} = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (20)$$

Величина удельной секундной диссипации энергии, обусловленная поперечной составляющей скорости потока  $U_T$  в кольцевом пространстве, определяется как отношение величины потерь энергии  $A_T$ , Дж, к длительности процесса протекания  $T_{\text{КП}}$ , с, и к массе протекающего потока  $M$ , кг.

$$\varepsilon_T = \frac{A_T}{M \cdot T_{\text{КП}}} = \frac{Q_c \cdot \rho_c \cdot g \cdot \Delta h_T}{Q_c \cdot \rho_c \cdot T_{\text{КП}}} = \frac{g \cdot \Delta h_T}{T_{\text{КП}}}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{с}^{-1}, \text{ м}^2/\text{с}^3, \quad (21)$$

где  $\rho_c$  – плотность водовоздушной смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\Delta h_T$  – потеря напора, обусловленная поперечной (тангенциальной) составляющей скорости, м;  $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$  – ускорение свободного падения.

С учетом формулы Дарси-Вейсбаха

$$\Delta h_T = \lambda_T \frac{l}{d_{\text{эц}}} \frac{v_T^2}{2g}, \text{ м}, \quad (22)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $l$  – длина пути, который пройдет поток за время  $T_{\text{КП}}$ , с, при скорости  $v_T$ , м/с, м, и формулы

$$T_{\text{КП}} = \frac{l}{v_T}, \text{ с}, \quad (23)$$

формула (21) запишется в виде

$$\varepsilon_T = g \frac{v_T}{l} \lambda_T \frac{l}{d_{\text{эц}}} \frac{v_T^2}{2g} = \frac{\lambda_T}{d_{\text{эц}}} \frac{v_T^2}{2}, \text{ м}^2/\text{с}^3. \quad (24)$$

В соответствии с формулой А.Д. Альтшуля при величине, эквивалентной шероховатости стенок кольцевого пространства  $\Delta \bar{\varepsilon} = 0,0001 \text{ м}$ , величина коэффициента гидравлического трения для поперечной составляющей скорости водовоздушного потока  $U_T$  будет иметь значение

$$\lambda_T = 0,11 \left( \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{d_{\text{эц}}} + \frac{68}{\text{Re}_o} \right)^{0,25} = 0,11 \left( \frac{0,0001}{0,05} + \frac{68}{103960} \right)^{0,25} = 0,025. \quad (25)$$

Для продольной составляющей скорости водовоздушного потока  $U_o$  она будет иметь значение

$$\lambda_o = 0,11 \left( \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{d_{\text{э2}}} + \frac{68}{\text{Re}_o} \right)^{0,25} = 0,11 \left( \frac{0,0001}{0,05} + \frac{68}{4950} \right)^{0,25} = 0,039. \quad (26)$$

Величина удельной секундной диссипации энергии потока водовоздушной смеси за счет поперечной составляющей скорости водовоздушного потока  $U_T$  будет иметь значение

$$\varepsilon_T = \frac{\lambda_T}{d_{\text{эц}}} \frac{v_T^3}{2} = \frac{0,025}{0,05} \frac{2,1^3}{2} = 2,3 \text{ м}^2/\text{с}. \quad (27)$$

Величина потерь напора в потоке водовоздушной смеси за счет поперечной составляющей скорости  $U_T$  при условии  $T_{\text{кп}} = \frac{H}{U_o} = \frac{l}{U_T}$  будет иметь значение

$$\Delta h_T = \lambda_T \frac{l}{d_{\text{эц}}} \frac{v_T^2}{2g} = \lambda_T \frac{H}{d_{\text{эц}}} \frac{v_T}{U_o} \frac{v_T^2}{2g} = \lambda_T \frac{H}{d_{\text{эц}}} \frac{v_T^3}{2gU_o} = 0,025 \frac{1,2}{0,05} \frac{2,1^3}{2 \cdot 9,8 \cdot 0,1} = 2,8 \text{ м}. \quad (28)$$

Величина удельной секундной диссипации энергии потока водовоздушной смеси за счет продольной составляющей скорости водовоздушного потока  $U_o$  будет иметь значение

$$\varepsilon_o = \frac{\lambda_o}{d_{\text{э2}}} \frac{v_o^3}{2} = \frac{0,039}{0,05} \frac{0,1^3}{2} = 0,0004 \text{ м}^2/\text{с}^3. \quad (29)$$

Рождающиеся в кольцевом пространстве турбулентные пульсационные составляющие  $\Delta U$  мгновенных скоростей  $U'$  перемещают относительно жидкости содержащиеся в водовоздушной смеси пузырьки воздуха, в результате чего происходит их дробление.

Дробление пузырьков воздуха возможно только под действием турбулентных пульсаций мгновенных скоростей потока, масштаб которых  $\lambda_b$  сопоставим с их характерным размером (диаметром  $d_n$ ).

Пульсации больших масштабов (размеров) просто переносят пузырьки воздуха с объемом окружающей его жидкости из одной точки потока в другую, не деформируя пузырек воздуха. Пульсации скоростей потока, имеющие масштаб гораздо меньший, чем размер пузырька воздуха ( $\lambda_b \ll d_n$ ), также не будут приводить к его дроблению.

В соответствии с теорией, разработанной А.Н. Колмагоровым и А.М. Обуховым на основе гипотезы Л.Ф. Ричардсона об «измельчении» масштабов турбулентности, турбулентность рассматривается как изотропный процесс измельчения пространственных масштабов пульсаций мгновенных скоростей потока  $\Delta U$ , происходящий в инерционном интервале от масштабов  $\lambda_0$ , наблюдаемых в пристеночных областях потока до наименьших масштабов нулевого порядка.

В этом случае величина кинематического коэффициента вязкости жидкости  $\nu$  не играет существенной роли, и в инерционной области масштабов турбулентных пульсаций скорости  $\lambda_0 \ll \lambda_l \ll \lambda_0$  энергия просто перетекает от турбулентных пульсаций большего масштаба к турбулентным пульсациям меньшего масштаба, а удельная диссипация энергии потока имеет постоянную величину  $\varepsilon = \text{const}$  и является функцией изменения скорости турбулентных возмущений  $\Delta U_\lambda$ , м/с, на расстоянии (масштабе)  $\lambda_l$ , м.

$$\varepsilon = f(\Delta U_\lambda; \lambda_l), \text{ Дж/кг}\cdot\text{с; м}^2/\text{с}^3 \quad (30)$$

Размерность величин  $\Delta U_\lambda$ , м/с, и  $\lambda_l$ , м, позволяет составить из них только одну комбинацию, имеющую размерность  $\text{м}^2/\text{с}^3$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta U_\lambda^3}{\lambda_l}, \text{ м}^2/\text{с}^3, \quad (31)$$

откуда

$$\Delta U_\lambda = (\lambda_l \cdot \varepsilon)^{1/3}, \text{ м/с.} \quad (32)$$

Изотропный процесс измельчения пространственных масштабов турбулентных пульсаций скоростей с течением времени приведет к уменьшению их значений с  $\lambda_0$  до величины внутреннего масштаба турбулентности (нулевого масштаба), при котором величина локального критерия Рейнольдса  $\text{Re}_{20}$  становится порядка единицы, и определяющее значение имеет величина вязкости потока:

$$\text{Re}_{\lambda_0} = \frac{\lambda_0 \cdot \Delta U_0}{\nu} = \frac{\lambda_0 (\lambda_l \cdot \varepsilon)^{1/3}}{\nu} = \frac{\lambda_0^{1/3} \cdot \varepsilon^{1/3}}{\nu} = 1. \quad (33)$$

Отсюда

$$\lambda_0 = \sqrt[4]{\frac{\nu^3}{\varepsilon}}, \text{ м.} \quad (34)$$

Из (34) и (32) имеем

$$\Delta U_{\lambda_0} = (\varepsilon \cdot \lambda_0)^{1/3} = \left( \frac{\varepsilon \cdot \nu^{3/4}}{\varepsilon^{1/4}} \right)^{1/3} = (\varepsilon^{3/4} \cdot \nu^{3/4})^{1/3} = \sqrt[4]{\varepsilon \cdot \nu}, \text{ м/с.} \quad (35)$$

Величины  $\Delta U_{\lambda_0}$ , м/с, и  $\lambda_0$  в пристеночном подслое зависят от характеристик тонкого пристеночного подслоя, образующегося на границе раздела фаз «поток – твердая стенка».

Прандтль Л. в пристеночной области потока жидкости выделял тонкий подслей, имеющий толщину  $\delta_*$ , м, названный им «ламинарным подслоем», в котором силы вязкого трения превышают силы инерции, вследствие чего в нем наблюдается режим «ползущего течения» при  $\text{Re}_0 < 1$ , где силы вязкого трения превышают силы инерции,

вследствие чего величина касательного напряжения силы вязкого трения и градиент скорости в пределах этого подслоя имеют постоянные значения ( $\tau_* = \text{const}$ ;  $G_* = \text{const}$ ), а величина местной скорости потока  $U_y$  в зависимости от расстояния от стенки  $y, \text{ м}$ , меняется по линейному закону:

$$U_y = \tau_* \cdot y, \text{ м/с}. \quad (36)$$

Приводимые Д.В. Штеренлихтом данные, полученные в ходе исследований структуры турбулентного потока жидкости вблизи стенки трубы, показывают, что гипотеза Прандтля о пристеночном слое, в котором наблюдается ламинарный поток жидкости и отсутствуют турбулентные пульсации величин местных скоростей, некорректна. В реальности наблюдаются значительные пульсации толщины пристеночного подслоя  $\delta_*$  и величин местных скоростей  $U$ , при этом осредненные за достаточно большой промежуток времени их значения  $\overline{\delta_*}$  и  $\overline{U}$  сохраняют постоянную величину. В связи с этим следует считать, что представления о пристеночном подслое, описываемые в формуле (36), являются лишь идеализированной расчетной схемой, не учитывающей эффекта турбулизации пристеночного подслоя, но позволяющей корректно описывать распределение в нем осредненных значений местных скоростей.

В работе [3] Ж. Буссинекса было предложено величину общего касательного напряжения сил вязкого трения в ядре турбулентного потока на расстоянии  $y$  от стенки русла определять как сумму касательного напряжения, обусловленного действием сил вязкого трения  $\tau_B, \text{ Н/м}^2$ , и касательного напряжения, обусловленного турбулентным перемешиванием  $\tau_T, \text{ Н/м}^2$ , и по аналогии с законом вязкости И. Ньютона выражать величину касательного напряжения в точке потока, обусловленного турбулентными пульсациями скорости  $\tau_y$  через кинематический коэффициент турбулентной вязкости  $\nu_T$

$$\tau_y = \tau_B + \tau_T = \rho(\nu + \nu_T) \frac{dU}{dy}, \text{ Н/м}^2, \quad (37)$$

где  $\frac{dU}{dy}$  – величина градиента скорости потока в рассматриваемой точке (на расстоянии  $y, \text{ м}$ , от стенки русла),  $\text{ с}^{-1}$ .

Поскольку турбулентные пульсации скорости наблюдаются как в ядре потока, так и в пристеночном подслое, то формула (37) будет также описывать и пристеночный подслей, и для него будет справедливо равенство

$$\nu_* = \nu + \nu_T = \alpha \cdot \nu, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (38)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий увеличение вязкости в пристеночном подслое за счет турбулентной составляющей.

Было высказано предположение [4], что по аналогии с ламинарным режимом движения поток (при котором  $\alpha = 1$ ) в осесимметричном турбулентном потоке будет выполняться равенство

$$\lambda_T = \frac{64}{\text{Re}_T} \alpha. \quad (39)$$

Отсюда

$$\lambda_T = \frac{\text{Re}_T \cdot \lambda_T}{64}. \quad (40)$$

В этом случае для описания пристеночной области потока могут быть использованы формулы

$$\lambda_{\delta} = \sqrt[4]{\frac{(\alpha \cdot v)^3}{\varepsilon}}, \text{ м}; \quad (41)$$

$$\Delta U_{\delta} = \sqrt[4]{\varepsilon \cdot \alpha \cdot v}, \text{ м/с}. \quad (42)$$

Подставляем в формулы (40) и (41) значение  $\alpha$ , рассчитанное по формуле (39), и  $\varepsilon_T$ , рассчитанное по формуле (27). Получим следующие характеристики потока в пристеночной области

$$\lambda_T = \frac{\text{Re}_T \cdot \lambda_T}{64} = \frac{103960 \cdot 0,025}{64} = 40,6; \quad (43)$$

$$\lambda_{\delta} = \sqrt[4]{\frac{(\alpha \cdot v)^3}{\varepsilon}} = \sqrt[4]{\frac{(40,6 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6})^3}{2,3}} = 0,00042 \text{ м} \approx 0,4 \text{ мм}; \quad (44)$$

$$\Delta U_{\lambda_{\delta}} = \sqrt[4]{2,3 \cdot 40,6 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}} = 0,099 \text{ м/с}. \quad (45)$$

Поскольку размер пузырьков воздуха, образующихся в процессе их диспергирования под действием турбулентных пульсаций величин мгновенных скоростей  $\Delta U_{\delta}$  в пристеночной области потока сопоставим с масштабом  $\lambda_{\delta}$  можно записать:

$$d_{\text{п}} \approx \lambda_{\delta} \approx 0,4 \text{ мм}. \quad (46)$$

Профессором А.Б. Адельшиным были предложены следующие эмпирические формулы для определения величин турбулентных пульсаций скорости потока в пристеночной области  $\Delta U_{\lambda_{\delta}}^{\ominus}$  и среднего диаметра образующихся пузырьков воздуха:

$$\Delta U_{\lambda_{\delta}}^{\ominus} = \frac{0,2U_T}{\text{Re}_T^{0,125}} = \frac{0,2 \cdot 2,1}{103960^{0,125}} = 0,099 \text{ м/с}; \quad (47)$$

$$d_{\text{п}} = K_{\text{гд}} \sqrt{\frac{\sigma \cdot v}{\rho (\Delta U_{\lambda_{\delta}})^3}} = 1,5 \sqrt{\frac{0,072 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}}{998,2 (0,099)^3}} = 0,00041 \text{ м} \approx 0,4 \text{ мм}, \quad (48)$$

где  $K_{\text{гд}} = 1,5$  – коэффициент, зависящий от гидродинамических условий, при которых осуществляется процесс диспергирования водовоздушной смеси.

Профессором М.А. Евилевичем была получена формула, описывающая зависимость среднего диаметра пузырька воздуха  $d_{\text{п}}$  в турбулентном потоке от значения величины удельной диссипации энергии  $\varepsilon$ :

$$d_{\text{п}} = K_{\text{гд}} \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{0,6} \frac{1}{\varepsilon^{0,4}} = 0,13 \left( \frac{0,072}{998,2} \right)^{0,6} \frac{1}{2,3^{0,4}} = 0,00031 \text{ мм} \approx 0,3 \text{ м}, \quad (49)$$

где  $K_{\text{гд}} = 1,3$  – коэффициент, зависящий от гидродинамических условий, при которых осуществляется процесс диспергирования водовоздушной смеси.

Расчеты, произведенные с использованием формул (48) и (49), показали, что при обработке водовоздушной смеси в кольцевом пространстве, образующемся между

двумя соосно расположенными цилиндрами, размер диспергированных пузырьков воздуха составит  $d_{п} = 0,2 - 0,5$  мм .

Полученная таким образом водовоздушная смесь может быть использована для вторичной обработки флотационного объема.

Проведенные теоретические исследования процесса напорной флотации позволили сделать следующие выводы:

- повысить эффективность процесса флотационной очистки сточных вод можно за счет уменьшения глубины зоны флотации;
- уменьшить глубину зоны флотации позволяет использование тонкослойных элементов – ламелей;
- существенно интенсифицировать процесс флотационной очистки сточных вод можно за счет повышения значения скорости всплывания образовавшихся флотокомплексов (увеличения их гидравлической крупности);
- повысить гидравлическую крупность образовавшихся флотокомплексов позволяет технологический прием вторичного насыщения флотируемой среды пузырьками воздуха, имеющими размеры  $d_{п} = 0,2 - 0,5$  мм и скорость всплывания  $v_{п} = 0,022 - 0,135$  м/с , получаемыми в результате обработки водовоздушной смеси в кольцевом пространстве между двумя соосно расположенными цилиндрами.

#### Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Флотационная очистка сточных вод. Математическое моделирование процессов гидродинамического диспергирования газовой фазы / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, В.Г. Камбург, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №3. – С. 138–142.
2. Андреев, С.Ю. Оценка эффекта истощения газовой фазы в процессе массопередачи в двухфазной системе «жидкость – газ» / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, Н.Н. Ласьков, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С. 158–165.
3. Bonssinesq, M.J. Theorie de iecoulement tourbillonnant et tumultueux dex liquids dans les lits reoctilignes a grands secton / M.J. Bonssines. – Paris: Gauthiez – Villarses Fies, 1897. – 67 p.
4. Андреев, С.Ю. Уточненная методика определения значений гидродинамических характеристик пристеночного подслоя турбулентного потока / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, М.А. Сафронов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №3. – С. 125–139.

#### References

1. Andreev, S.Yu. Flotation wastewater treatment. Mathematical modeling of the processes of hydrodynamic dispersion of the gas phase / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, V.G. Kamburg, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 3. – P. 138–142.
2. Andreev, S.Yu. Assessment of the effect of gas phase depletion in the process of mass transfer in a two-phase «liquid – gas» system / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, N.N. Laskov, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4. – P. 158–165.
3. Bonssinesq, M.J. Theorie de iecoulement tourbillonnant et tumultueux dex liquids dans les grands lits reoctilignes a secton / M. J. Bonssines. – Paris: Gauthiez – Villarses Fies, 1897. – 67 p.
4. Andreev, S.Yu. Refined method for determining the values of the hydrodynamic characteristics of the near-wall sublayer of a turbulent flow / C.Y. Andreev, I.A. Gurkina, M.A. Safronov // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3. – P. 125–139.

УДК [72+69] : 620.91 – 049.35

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

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

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

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

## ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ И ЭНЕРГОАКТИВНОСТИ МАЛОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

А.М. Береговой

Показана целесообразность восстановления тепловой защиты жилых зданий старой застройки. На основании результатов натурных и теоретических исследований даны рекомендации по повышению тепловой защиты и энергоактивности этого типа зданий. Установлено, что использование в архитектурно-строительном решении ряда технических устройств – бетонных каналов и воздуховодов в заглубленной части дома, упрощенной конструкции плоского солнечного коллектора, теплозащитных штор – способствует повышению тепловой защиты и энергоактивности таких зданий.

*Ключевые слова:* малоэтажные здания, тепловая защита зданий, энергоактивность зданий, возобновляемые источники энергии

## THERMAL PROTECTION INCREASING AND ENERGY ACTIVITY OF LOW-RISE BUILDINGS

A.M. Beregovoy

The expediency of restoration of thermal protection of old residential buildings is shown. Based on the results of field and theoretical studies, recommendations are given for increasing the thermal protection and energy activity of this type of building. It has been established, that the use of a number of technical devices in the architectural and construction solution (concrete channels and air ducts in the recessed part of the building, a simplified design of a flat solar collector, heat protection curtains) helps to increase the thermal protection and energy activity of such buildings.

*Keywords:* low-rise buildings, thermal protection of buildings, energy activity of buildings, renewable energy sources

В последние годы все большее значение приобретает проблема термомодернизации и повышения энергоэффективности зданий, построенных в первый индустриальный период и по типовым проектам 1960-70-х годов [1–3]. Исследования по повышению тепловой защиты зданий старой застройки представляются актуальными и экономически выгодными, учитывая, что строительство новых зданий взамен ветхого фонда может обойтись в сумму порядка нескольких триллионов рублей.

Для подтверждения такого подхода был выполнен расчет эффективности восстановления тепловой защиты двух типов жилых домов при следующих исходных данных (табл.1).

Т а б л и ц а 1

Тип дома	Общая площадь, м <sup>2</sup>	C <sub>в</sub>	C <sub>т</sub> , руб.
2-этажный, 18 кв.	1 000	30 000 руб.	0,5 млн
5-этажный, 60 кв.	3 500	30 000 руб.	2.0 млн

П р и м е ч а н и е . Показателями C<sub>в</sub> и C<sub>т</sub> обозначены соответственно стоимость 1 м<sup>2</sup> общей площади на вторичном рынке жилья и стоимость термомодернизации домов.

Как показал расчет, за счет экономии тепловой энергии в холодный период года приблизительная эффективность восстановления тепловой защиты домов при условии продления срока их службы на 10 лет составит: 2,5 млн руб. – для 2-этажного и 8,5 млн руб. – для 5-этажного дома.

В результате проведения натурных обследований малоэтажной жилой застройки, построенной в г. Пензе в середине прошлого столетия, было установлено следующее:

- часть зданий с вполне удовлетворительным физико-механическим состоянием конструкций существенно потеряла свои функциональные свойства из-за значительного ухудшения теплотехнических свойств наружных ограждений;
- низкий уровень тепловой защиты имеют чердачные и цокольные перекрытия этих зданий;
- температуры воздуха помещений верхнего и нижнего этажей в зимний период ниже на 2–3°C по сравнению с нормативными значениями;
- малая степень использования возобновляемых источников энергии в виде тепла земли и солнечной радиации.

Анализ результатов натурных обследований позволил установить причины снижения тепловой эффективности и способ термомодернизации конструкций крыш.

Предполагалось, что основная причина заключалась в отсутствии воздухопроницаемого слоя и в разрушении структуры сыпучего утеплителя (котельного шлака) в чердачных перекрытиях с дощатым заполнением по деревянным балкам, а также в недостаточной толщине теплоизоляции в цокольных перекрытиях.

В качестве обобщенного критерия энергоэффективности для исследуемого случая был принят общий коэффициент теплопередачи через наружные ограждающие конструкции здания [2]

$$K_m^{tr} = \left( A_w / R_w^r + A_F / R_F^r + A_{ed} / R_{ed}^r + A_c / R_c^r + A_f / R_f^r \right) / A_e^{sum},$$

где  $A$ ,  $m^2$ , и  $R$ ,  $m^2 \cdot C / Вт$ , – соответственно площади и приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций – стен, заполнений светопроемов, наружных дверей, чердачного и цокольного перекрытий;  $A_e^{sum}$  – общая площадь внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций,  $m^2$ .

Анализ проектной документации показал следующие данные после введения здания в эксплуатацию: критерий  $K_m^{tr} = 1,13$ ; для чердачного перекрытия  $R_c^r = 1,35$  и коэффициент теплопередачи  $k_c = 1/R = 0,74$ .

После проведения обследований в результате расчетов было установлено, что  $R_w^r = 1,04$ ;  $R_F^r = 0,44$ ;  $R_{ed}^r = 0,6$ ;  $R_{c1}^r = 0,95$ ;  $R_f^r = 1,0$ ;  $k_{14} = 1,05$ .

Таким образом, коэффициент теплопередачи этого перекрытия за время эксплуатации увеличился в 1,4 раза. Последующее теоретическое исследование подтвердило, что при таком состоянии тепловой защиты резко возрастают тепловые потери через эту конструкцию. Расчет производился с использованием формулы, определяющей тепловые потери при эксфильтрации воздуха [4]:

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

По результатам расчета с учетом эксфильтрации теплого воздуха обследованная конструкция имела величину удельных тепловых потерь, в три раза большую, по сравнению с нормативной.

При термомодернизации упомянутого наружного ограждения была рекомендована полная замена утеплителя или укладка по его верху дополнительного слоя из жесткой минеральной ваты и конструктивного слоя с большим сопротивлением воздухопроницанию. В качестве последнего могут быть использованы пароизоляционный слой (при замене утеплителя) или предусмотренный нормами верхний слой цементно-песчаной стяжки.

Низкая степень энергоактивности характерна не только для обследованных зданий старой застройки, но и для всего жилого массива страны, построенного по типовым сериям в 60-70-х годах прошлого столетия. Их объемно-планировочные и архитек-

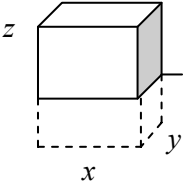
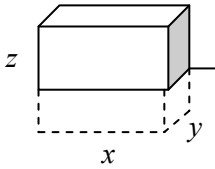


турно-конструктивные решения не приспособлены к использованию таких общедоступных возобновляемых источников энергии, как тепло земли и солнечной радиации. Среди этого жилого фонда особый интерес представляют малоэтажные дома, которые, в отличие от многоэтажных, имеют малую тепловую нагрузку, что значительно увеличивает возможности по повышению доли тепла от возобновляемых источников энергии.

Проведенные исследования позволили оценить энергетическую эффективность применения ряда способов, которые повышают энергоактивность и тепловую защиту таких зданий (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

## Способы повышения энергоактивности и тепловой защиты малоэтажных зданий

Способы	Исходные данные расчета	Энергетическая эффективность
Использование тепла земли: 1. Бетонные каналы под полом подвального помещения [5] 2. Воздуховод в подвальном помещении [6]	Среднесуточные значения температуры воздуха $t_x$ в сечении $x$ канала $t_x = t - (t_c - t_n) e^{-Ax}$ Количество воздуха, проходящего через канал шириной $\delta_x$ и высотой $\delta_y$ $G_k = v_{вп} \cdot \rho_{вп} \cdot \delta_x \cdot \delta_y \cdot c.$ Количество тепла на подогрев воздуха в воздуховоде $Q_{п} = c \cdot G_{под} (t_{п} - t_{н})$	В здании с площадью отопления 120 м <sup>2</sup> при 8-канальной прокладке подземных каналов доля тепла земли может составить 26–40 % от тепловой нагрузки системы воздушного отопления
Подземное помещение, подогреваемое теплом верхних слоев земли	$F_n = f(l/x, y, z)$ 	С уменьшением размеров подземного помещения эффективность использования тепла земли увеличивается
Использование тепла солнечной радиации с помощью упрощенной конструкции плоского солнечного коллектора [7]	Эффективность конструкции на наружной стене $\eta = Q_u / A \cdot I_T = F_R (\tau \cdot \alpha)_n - F_R \cdot U_L (T_{вх} - T_a) / I_T$ Тепловая производительность конструкции $f = Q_T / L$	Для центральных регионов доля солнечного тепла $f$ в тепловой нагрузке жилого дома площадью 122 м <sup>2</sup> за отопительный период может составить 15 %
Здание длиной $x$ и шириной $y$ , облучаемое солнечной радиацией	$F_c = f(x, y)$ 	С уменьшением размера $y$ эффективность использования тепла солнечной радиации увеличивается
Повышение теплозащиты окон с помощью теплозащитных штор [8]	Срок окупаемости инвестиций $T_d = -\ln [1 - rT_0] / \ln(1 + r),$ Удельные теплопотери через окна $q_{ок} = S_{ок} \cdot Q_{общ} / S_{отоп}$ С учетом штор $Q_{шт} = q_{окон} \cdot z_{от}$	Для центральных регионов тепловые потери через окна с теплозащитными шторами за отопительный период могут уменьшиться в 2,4 раза

Показанный в табл. 2 способ использования тепла земли с помощью тонкостенных бетонных каналов достаточно эффективен благодаря тому, что поступающий из подземных каналов наружный воздух будет иметь температуру более высокую, чем приточный вентиляционный воздух. Подогрев циркулирующего в каналах воздуха осуществляется земляным массивом, который представляет собой мощный природный источник низкопотенциальной энергии.

В данной расчетной модели предусмотрена взаимосвязь подогретого воздуха с системой воздушного отопления и принято, что температуры наружного воздуха и в подвальном помещении, а также слоя окружающего земляного массива равны соответственно  $-29$ ,  $+14$  и  $+5$  °С.

В расчетной модели использовались формулы

$$t_x = t_c - (t_c - t_n) \cdot e^{-Ax},$$

$$Q = 0,28 \cdot w_{\text{вент}} \gamma_n c (t_b - t_n),$$

$$w_{\text{вент}} = 3600 v_{\text{вп}} \rho_{\text{вп}} S \cdot c_b;$$

здесь  $w_{\text{вент}}$  – расход воздуха, кг/ч;  $v_{\text{вп}}$  и  $\rho_{\text{вп}}$  – соответственно скорость, м/с, и плотность, кг/м<sup>3</sup>, воздуха в воздуховоде;  $S$  – площадь сечения воздуховода, м<sup>2</sup>;  $c_b$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С).

В результате данного исследования установлены:

– хорошая сходимость полученных теоретических данных с экспериментальными значениями;

– возможность получения экономии тепловой энергии на отопление до 11, 37 и 48 % для жилых помещений с площадью отопления  $S_{\text{от}}$  соответственно 60, 18 и 11 м<sup>2</sup>.

Упомянутый способ по использованию упрощенного варианта плоского солнечного коллектора эффективен в зданиях, имеющих, во-первых,  $S_{\text{от}}$  в пределах 100–150 м<sup>2</sup>, а во-вторых, небольшую тепловую нагрузку. В таких зданиях за счет увеличения доли тепла  $f$  за отопительный период удельная величина тепловой энергии на отопление может быть снижена в 1,5 раза. В домах с большой величиной  $S_{\text{от}}$  показатель  $f$  весьма незначителен (например, для 18-квартирного здания  $f = 3,5$  % при  $S_{\text{от}} = 1200$  м<sup>2</sup>).

Теплозащитные шторы на окнах как средство повышения их тепловой защиты могут быть использованы в зданиях любой этажности. Они приводятся в рабочее состояние в темное время суток и устанавливаются с внутренней стороны оконной конструкции на специальных направляющих. Эффект экономии тепловой энергии, показанный в табл. 2, найден при условии использования модифицированной конструкции широко распространенных светозащитных штор, на пластинки которых наклеиваются полоски из пенополистирола толщиной 20 мм.

Таким образом, на основании результатов натурных и теоретических исследований установлено, что коэффициент теплопередачи через наружное ограждение малоэтажного здания старой застройки может увеличиться в 1,4 раза. Существенному уменьшению тепловых потерь способствует включение в конструкцию дополнительного слоя с высоким сопротивлением воздухопроницанию, а также слоя эффективной теплоизоляции.

Использование таких технических устройств, как бетонные каналы и воздуховоды в заглубленной части здания, упрощенная конструкция плоского солнечного коллектора, теплозащитные шторы, может обеспечить долю возобновляемых источников энергии в общей тепловой нагрузке дома от 15 до 40 % и повысить его тепловую защиту.

### Список литературы

1. Езерский, В.А. Техничко-экономическая оценка термомодернизации жилых зданий / В.А. Езерский, П.В. Монастырев, Р. Клычников. – URL: <https://iasv.ru/tekhniko-ekonomicheskaya-otsenka-termomodernizatsii-zhilykh-zdaniy.html> (дата обращения: 21.10.20).

2. Береговой, А.М. Энергосбережение в жилых зданиях с большим сроком эксплуатации / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Петрянина // Известия вузов. Строительство. – 2011. – №5. – С. 59–64.
3. Дерина, М.А. Повышение тепловой эффективности малоэтажных гражданских зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.А. Дерина. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 20 с.
4. Береговой, А.М. Оценка тепловых потерь при эксфильтрации воздуха через пористую структуру материала ограждения / А.М. Береговой, М.А. Дерина, В.А. Береговой, А.В. Мальцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 79–83.
5. Береговой, А.М. Энергосбережение в индивидуальном жилом доме при использовании тепла верхних слоев земли / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Известия вузов. Строительство. – 2008. – №10. – С. 54–58.
6. Береговой, А.М. Использование тепла подземных помещений в энергосбережении / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 85–89.
7. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции, адаптированные к использованию энергии природной среды / А.М. Береговой, А.П. Прошин, В.А. Береговой, А.В. Гречишкин // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 2. – С.4–8.
8. Береговой, А.М. Техничко-экономическая эффективность энергосберегающих решений в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №2. – С. 144–148.

#### References

1. Yezersky, V.A. Technical and economic assessment of thermal modernization of residential buildings / V.A. Yezersky, P.V. Monastyrev, R. Klychnikov. – URL: <https://iasv.ru/tekhniko-ekonomicheskaya-otsenka-termomodernizatsii-zhilykh-zdaniy.html> (accessed: 21.10.20).
2. Beregovoy, A.M. Energy savings in the residential buildings with big service-life / A.M. Beregovoy, V. A. Beregovoy. A.V. Maltsev. M. A. Petryanina // News of higher educational institutions. Construction. – 2011. – No 5. – P. 59–64.
3. Derina M.A. Improving the thermal efficiency of low-rise civil buildings: abstract of dis. ... of the Candidate of Sciences. – Penza: PGUAS, 2016. – 20 p.
4. Beregovoy, A.M. Evaluation of heat losses during exfiltration of air through the porous structure of the material of the enclosure structure / A.M. Beregovoy, M.A. Derina, V.A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering. – 2014. – No.2. – P. 79–83.
5. Beregovoy, A.M. 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. – No 10. – P. 54–58.
6. Beregovoy, A.M. Using of underground rooms heat in energy saving / A.M. Beregovoy, M.A. Derina, V.A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering. – 2016. – No.1. – P. 85–89.
7. Beregovoy, A.M. External enclosure structures, adapted to the use of the energy of the natural environment / A.M. Beregovoy, A.P. Proshin, V.A. Beregovoy, A.V. Grechishkin // News of Higher Educational Institutions. Construction. – 2005. – No. 2. – P. 4–8.
8. Beregovoy, A.M. Techno-economic efficiency of energy savings solutions in architecture and construction design / A.M. Beregovoy, M.A. Derina, L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2015. – No.2. – P. 144–148.

УДК 621.6.036

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*

Россия, 410054, г. Саратов,  
ул. Политехническая, 77,  
тел.: (8452) 51-50-18

**Усачев Александр Прокофьевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Теплогазоснабжение,  
вентиляция, водообеспечение  
и прикладная гидрогазодинамика»  
E-mail: usachev-ap@mail.ru

**Рулев Александр Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Теплогазоснабжение,  
вентиляция, водообеспечение и прикладная  
гидрогазодинамика»

*АО "Гипрониигаз"*

Россия, 410012, г. Саратов,  
проспект им. Кирова С.М., д. 54,  
тел.: (845-2) 74-94-95

**Шурайц Александр Лазаревич,**  
доктор технических наук, генеральный  
директор АО «Гипрониигаз»  
E-mail: Shurait@niigaz.ru

**Бирюков Александр Валерьевич,**  
кандидат технических наук, директор  
научно-исследовательского центра  
АО «Гипрониигаз»  
E-mail: Biryukov@niigaz.ru

*Нижегородский филиал АО «Гипрониигаз»*

Россия, 603022, г. Нижний Новгород,  
ул. Пушкина, д. 18,  
тел. (831) 430-00-05

**Соловьев Владимир Александрович,**  
аспирант, главный инженер  
nfniigaz@mts-nn.ru

*Saratov State Technical University named  
after Gagarin Yu.A.*

Russia, 410054, Saratov,  
77, Politechnicheskaya St.,  
tel.: (8452) 51-50-18

**Usachev Aleksander Prokofievich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Heat and Gas Supply,  
Ventilation, Water Supply and Applied  
Hydrogasodynamics»  
E-mail: usachev-ap@mail.ru

**Rulev Aleksander Vladimirovich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Heat and Gas Supply,  
Ventilation, Water Supply and Applied  
Hydrogasodynamics»

*JSC «Giproniigas»*

Russia, 410012, Saratov,  
54, Kirov Avenue,  
tel.: (845-2) 74-94-95

**Shurayts Aleksander Lazarevich,**  
Doctor of Sciences, General Director of  
JSC «Giproniigas»  
E-mail: Shurait@niigaz.ru

**Biryukov Aleksander Valeryevich,**  
Candidate of Sciences, Director of the  
research center of Giproniigas PLC  
E-mail: Biryukov@niigaz.ru

*Nizhny Novgorod branch of JSC «Giproniigas»*

Russia, 603022, Nizhny Novgorod,  
18, Pushkin St.,  
tel. (831) 430-00-05

**Soloviev Vladimir Aleksandrovich,**  
Postgraduate student, Chief engineer  
nfniigaz@mts-nn.ru

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ГРУБОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ, РАЗМЕЩЕННЫХ В ОДНОМ КОРПУСЕ ГАЗОВОЙ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ УСТАНОВКИ

А.П. Усачев, А.В. Рулев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирюков, В.А. Соловьев

Представлены полученные зависимости для определения места установки датчиков перепада давления на плоских фильтрующих элементах грубой и тонкой очистки, размещенных в одном корпусе газовой двухступенчатой установки очистки. Показано влияние на величину перепада давления расхода газа через ФПЭ.

*Ключевые слова: контроль, перепад давления, природный газ, газоочистка, фильтрация, пункты редуцирования газа*

# IMPROVEMENT OF PRESSURE DROP CONTROL ON FLAT FILTER ELEMENTS OF COARSE AND FINE CLEANING PLACED IN THE SAME HOUSING OF A GAS TWO-STAGE INSTALLATION

A.P. Usachev, A.V. Rulev, A.L. Shuraitis, A.V. Birukov, V.A. Soloviev

In this paper, dependencies are obtained for determining the location of differential pressure sensors on flat filter elements of coarse and fine cleaning placed in the same casing of a gas two-stage installation. The effect of the transit gas flow rate on the pressure value is shown. It is proved that at the initial point of the installation, the pressure will always be higher than in the more remote part of it.

*Keywords:* control, pressure drop, natural gas, gas cleaning, filtration, gas reduction installations

## 1. Вводная часть и актуальность разработки зависимостей для обоснования места размещения датчиков перепада давления на фильтрующих плоских элементах грубой и тонкой очистки

Потребность в оснащении газовых сетей современными пунктами редуцирования газа (ПРГ) высокой пропускной способности обусловлена прежде всего большой потребностью в природном газе вследствие суровых климатических условий Российской Федерации. В настоящее время успешно эксплуатируется свыше пятидесяти ПРГ, оснащенных высокоточным газовым оборудованием большой пропускной способности, что, согласно современным подходам [1, 2], обеспечивается за счет использования двухступенчатых установок грубой и тонкой очистки, которые размещаются в отдельных корпусах.

Однако такие установки имеют недостаточную пропускную способность, высокую частоту операций по регенерации фильтрующих элементов и, следовательно, большие эксплуатационные расходы. В целях устранения указанных недостатков были разработаны новые принципы и положения по повышению пропускной способности двухступенчатых установок (рис. 1) за счет расположения в объеме одного корпуса ряда соединенных параллельно фильтрующих плоских элементов (ФПЭ) с гофрированной сеткой. При этом каждый ФПЭ содержит камеры для поступления загрязненного и сбора очищенного газа. В предложенной конструкции плоской двухступенчатой установки (ПДУ) предусмотрена возможность повышения пропускной способности путем увеличения количества ФПЭ без проведения технического перевооружения ПРГ. Предлагаемая конструкция защищена патентом RU №131989U [3]. Стрелки на линиях рис. 1 показывают направление потока газа.

Входные и выходные патрубки располагаются на одной горизонтальной оси и находятся на одной высотной отметке, удобной для обслуживания и ремонта (см. рис.1).

Состоянию фильтрующих сеток при постоянном значении расхода газа на ПДУ соответствует строго определенный перепад давления на ФПЭ, который определяется путем замера последнего с помощью дифференциальных манометров, получающих импульс от датчиков перепада давления.

В настоящее время нет четких рекомендаций по месту установки датчиков перепада давления, и вследствие этого они устанавливаются в произвольных точках по высоте фильтрующих элементов грубой и тонкой очистки и по расстоянию до поверхности ФПЭ. Так, для существующих технических решений [4–6] датчики перепада давления устанавливаются на входных и выходных патрубках ПДУ, что существенно увеличивает расстояние между двумя корпусами установок очистки, а следовательно, материало- и энергоемкость установок очистки и отводимых под их размещение строительных ограждений. Не исследовано влияние расхода газа на величину давления в начальной точке ПДУ.

В связи с этим актуальной задачей при освоении двухступенчатых установок очистки газа высокой пропускной способности является определение места установки датчиков перепада давления для ФПЭ грубой и тонкой очистки. Актуальным является также определение влияния расхода газа через ПДУ на величину давления в месте установки датчиков.

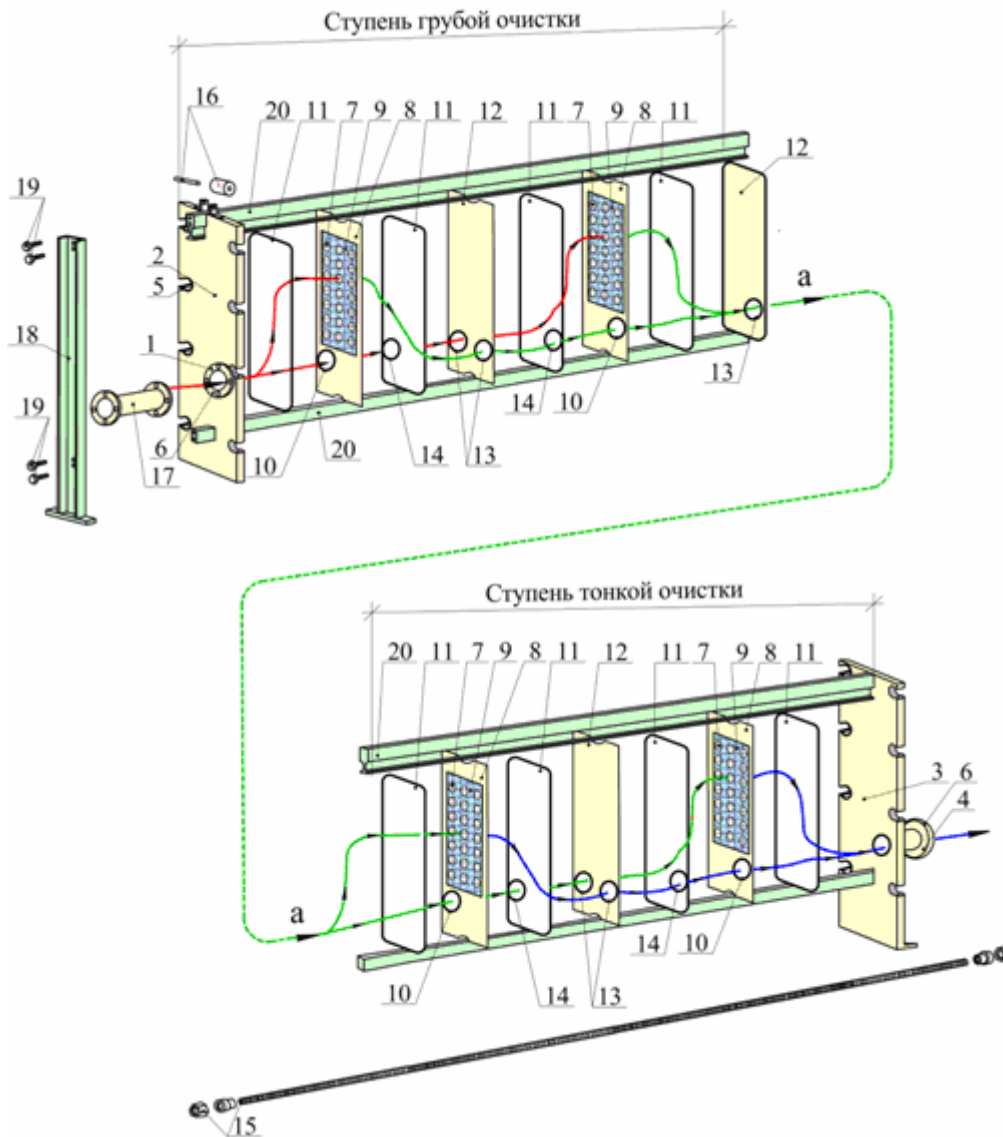


Рис. 1. Двухступенчатая установка газовой очистки, содержащая ряд ФПЭ, параллельно соединенных между собой в одном корпусе с присоединением входного и выходного патрубков с разных сторон фильтра на одном уровне по высоте:

- 1, 4 – входной и выходной патрубки для присоединения к распределительным газопроводам на входе и выходе двухступенчатой установки газовой очистки с помощью фланцев 6;
- 2 и 3 – первая и вторая прижимные крышки с отверстиями 5 по границам их боковых сторон для резьбовых шпилек 15; 7 – ряд круглых отверстий в пластинах 8 ступеней грубой и тонкой очистки; 8 – одна из ряда фильтрующих пластин ступеней грубой и тонкой очистки;
- 9 – плоский фильтрующий элемент из гофрированной металлической сетки для ступени грубой очистки или из гофрированного фильтрующего полотна для ступени тонкой очистки;
- 10 – входное отверстие в каждой из фильтрующих пластин 8 ступеней грубой и тонкой очистки; 11 – уплотнительная прокладка между пластинами 8 и 12, а также крышкой 3 и пластиной 8; 12 – сплошная пластина ступеней грубой и тонкой очистки; 13 – входные отверстия в каждой пластине 12 для грубоочищенного и неочищенного газа для ступени грубой очистки и для грубоочищенного и тонко очищенного газа для ступени тонкой очистки;
- 14 – кольцо уплотнительное между отверстиями 10 и 13; 15 – резьбовые шпильки с шайбами и гайками; 16 – втулка и шпилька для перемещения вдоль верхней штанги 20 крышки 2; 17 – трубная вставка, демонтируемая для раздвижки между собой крышки 2, пластин 8 и 12; 18 и 19 – стойка опорная и болты для присоединения к ним верхней и нижней направляющих штанг 20;
- 20 – верхняя и нижняя направляющие штанги для перемещения и фиксации крышки 2 и пластин 8 и 12

## 2. Определение давления в месте установки датчика в зависимости от изменения расхода газа по длине ступеней грубой и тонкой очистки двухступенчатой установки очистки

Определение давления в месте установки датчика в зависимости от величины расхода газа в ступенях грубой и тонкой очистки двухступенчатой установки очистки проследим отдельно по рис. 2.

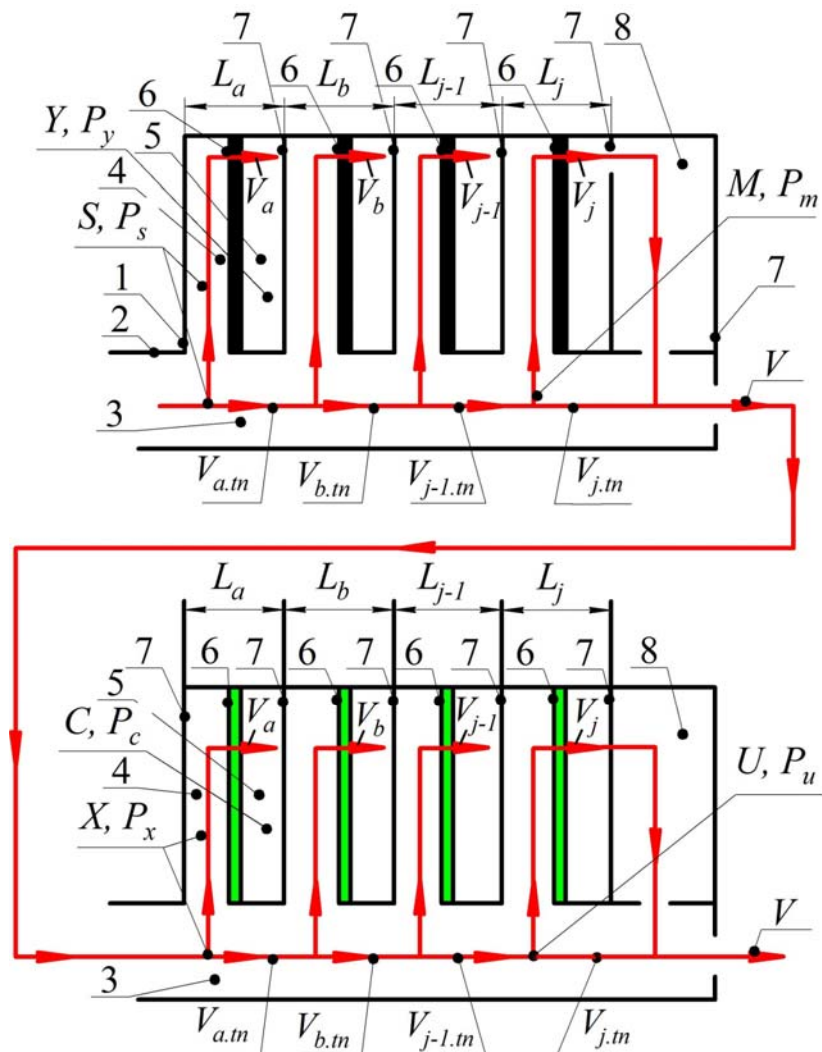


Рис. 2. Схема к определению давления в месте установки датчика в зависимости от расхода газа в ступенях грубой и тонкой очистки двухступенчатой установки очистки:  
 1 – прижимная крышка; 2 – входной патрубков; 3 – кольцевой канал для подачи неочищенного газа для ступени грубой очистки и грубоочищенного газа для ступени тонкой очистки; 4 – датчики для замера давления неочищенного или грубоочищенного газа; 5 – датчики для замера давления грубоочищенного или тонко очищенного газа; 6 – одна из ряда фильтрующих пластин ступеней грубой и тонкой очистки; 7 – одна из ряда сплошных пластин ступеней грубой и тонкой очистки; 8 – камера для сбора грубоочищенного или тонко очищенного газа

На рис. 2 показаны только каналы 3 по распределению неочищенного газа (верхняя часть рис. 2) от начальной точки  $S$  до конечной точки  $M$  и грубоочищенного газа (нижняя часть рис. 2) от начальной точки  $X$  до конечной точки  $U$ . Также в концевой части показана камера, где собирается весь объем газа, очищенного в ступени грубой очистки.

С целью выбора места расположения датчиков перепада давления проанализируем картину течения потока: 1) от входа неочищенного газа (точка  $S$ ) до его выхода (точка  $M$ ); 2) от входа грубоочищенного газа (точка  $X$ ) до его выхода (точка  $U$ ) (см. рис. 2).

Разделим всю длину ПДУ грубой и тонкой очистки на ряд участков  $\delta = a; b; j-1; j$  равной длины  $L_a, L_b, \dots, L_{j-1}, L_j$ . Границы участков на рис. 2 изображены черными сплошными линиями.

Величина давления неочищенного и грубоочищенного газа в начальных точках  $S$  и  $X$  определяется согласно [7]:

$$P_{s(x)} = P_{m(u)} + \Delta P_{tr}, \quad (1)$$

где  $P_{m(u)}$  – величина давления неочищенного и грубоочищенного газа на конечном участке канала 3 в конечных точках  $M$  и  $U$  (индексы для грубоочищенного газа в обозначениях проставлены в скобках) кольцевого пространства 3 (см. рис. 2), Па;  $\Delta P_{tr}$  – газодинамические потери на трение при течении потока неочищенного газа на участке между точками  $S$  и  $M$  и грубоочищенного газа на участке между точками  $X$  и  $U$ , Па.

Течение газа в ПДУ осуществляется за счет перепада давлений, создаваемого путем его отбора в выходной патрубке 6, когда давление на выходе (точка  $U$ ) будет всегда меньше, чем на входе (точка  $S$ ). Общий перепад давлений ( $P_s - P_u$ ) обуславливает распределение давлений газа по всему пути его следования от точки  $S$  до  $M$  и от точки  $X$  до  $U$  следующим образом.

Газодинамические потери на трение и местные сопротивления в формуле (2), имеющие место при течении потока неочищенного и грубоочищенного газа на участке между точками  $S$  и  $M$  и от точки  $X$  до  $U$ , определяются согласно [7]:

$$\Delta P_{tr} = \sum_{\delta=1}^{\delta=j} \left( \frac{\lambda \cdot L_{\delta=j}}{d_{\delta=j}} + \zeta_{\delta=j} \right) \frac{(V^{\delta.m}/F)^2 \cdot \rho}{2 \cdot g}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент шероховатости стенок пространства коллектора 3 состоящего из ряда отверстий в пластинах, герметично соединенных друг с другом с помощью кольцевых прокладок;  $L_{\delta=j}$  – длина участка пространства коллектора 3, состоящего из ряда отверстий в пластинах 6, герметично соединенных друг с другом с помощью кольцевых прокладок;  $d$  – постоянный диаметр внутреннего кольцевого пространства, м;

$\sum_{\delta=1}^{\delta=j} \zeta_{\delta=j}$  – суммарная величина коэффициента местного сопротивления на участках  $a, b, \dots, j-1, j$  для случая горизонтального течения потока с равномерным отбором части газа в ФПЭ, грубой и тонкой очистки с поворотом на  $90^\circ$ ;  $V^{\delta.m}$ ;  $F$  – транзитный расход и проходное сечение кольцевого пространства 3;  $\rho$  – плотность газа во внутреннем пространстве 3 при его фактическом давлении,  $\text{кг/м}^3$ .

Из рис. 2 видно, что газ из входного патрубка 2 растекается по всей нижней части проходного сечения 3 и отсюда, поднимаясь вверх, равномерно поступает в фильтрующие плоские сетки.

Заменим равномерно распределенные расходы, проходящие через фильтрующие поверхности ФПЭ, на ряд сосредоточенных  $V^\delta = V^a, V^b, \dots, V^{j-1}, V^j$  в пределах каждого участка  $a, b, \dots, j-1, j$ . При этом все сосредоточенные расходы равны между собой:  $V^a = V^b = V^{j-1} = V^j$ .

Суммарный расход запишется следующим образом:

$$V = V^a + V^b + \dots + V^{j-1} + V^j. \quad (3)$$

Расходы на каждом участке вычисляются как:

$$V^{a.m} = V - 0,5V^a; \quad (4)$$



$$V^{b.m} = V - (0,5V^b + V^a); \quad (5)$$

$$V^{j-1.m} = V - (0,5V^{j-1} + V^a + V^b); \quad (6)$$

$$V^{j.m} = V - (V^a + V^b + \dots + V^{j-1} + 0,5V^j). \quad (7)$$

Формула для определения сосредоточенного расхода газа в пределах каждого участка  $a, b, \dots, j-1, j$ :

$$V^\delta = \frac{V}{\delta}. \quad (8)$$

Анализ формул (4) – (7) показывает, что значения транзитного расхода по мере его течения по длине установки равномерно уменьшаются. Так, например, при наличии четырех участков  $a, b, j-1, j$  и в предположении равномерной раздачи газа на всем пути движения от  $a$  до  $j$  величина транзитного расхода на участке  $j$ , согласно (6), составит:  $V^{j.m} = 0,5V^j = 0,5(V/4) = 0,125V$ , то есть примерно 12,5 % от суммарного расхода газа  $V$ .

Анализ формул (1)-(2) показывает, что давление неочищенного газа  $P_s$  в начальной точке ФПЭ 6 (т.  $S$ ) или грубоочищенного газа  $P_x$  в начальной точке ФПЭ 6 (т.  $X$ ) будет всегда больше, чем в наиболее удаленной (т.  $M$ ), то есть  $P_s > P_m$  или  $P_x > P_u$  на величину потерь давления на трение  $\Delta P_{tr}$  на участке кольцевого пространства 3. Это обуславливает большее количество протекающего газа, а следовательно, и более высокое количество твердых примесей, оседающих в нижней части ФПЭ грубой и тонкой очистки, и, как следствие, большую степень засоренности его фильтрующего материала.

Отсюда следует, что замер статических давлений в начальной части ступеней грубой и тонкой очистки покажет более высокое значение, чем в конечных их частях. При этом максимально допустимое значение перепада давления в начальной части фильтрующих элементов по сравнению с конечными точками замера будет достигнуто в более ранний период.

### Заключение

1. Получена формула (8) для определения сосредоточенного расхода газа в пределах каждого участка  $a, b, \dots, j-1, j$ . Анализ формулы (8) показывает, что значения сосредоточенного расхода по мере течения потока газа на каждом участке  $a, b, j-1, j$  в предположении равномерной раздачи потока на всем пути движения от  $a$  до  $j$  практически остаются постоянными.

2. Предложены формулы (4)–(7) для определения расходов газа в кольцевом канале 3 в пределах каждого участка  $a, b, \dots, j-1, j$  при наличии равномерной раздачи потока по длине ФПЭ. Анализ формул (4)–(7) показывает, что значения транзитного расхода по мере течения потока газа равномерно уменьшаются. Так, например, при наличии участков  $a, b, j-1, j$  и в предположении равномерной раздачи газа на всем пути движения от  $a$  до  $j$  величина транзитного расхода на участке  $j$ , согласно (7), составит:  $V^{j.m} = 0,5V^j = 0,5(V/4) = 0,125V$ , то есть 12,5 % от суммарного расхода газа  $V$ .

3. Результаты расчетов, согласно формулам (1)–(7), показывают, что максимальный перепад давлений в канале 3 и ФПЭ имеет место в начальной его части в точке  $S$  при течении потока неочищенного газа и в точке  $X$  для грубоочищенного газа, и он всегда больше, чем в его конечной части. Это обуславливает пропорционально более высокое количество протекающего газа, а значит, и большее количество твердых частиц, оседающих в начальной части, и, как следствие, большую степень засоренности его фильтрующего материала.

4. Замер перепада давления в начальной части ПДУ, наиболее засоренной твердыми частицами, дает возможность более раннего получения сигнала на диспетчерском пульте и обеспечивает временной запас для технического персонала по своевременному удалению накопившихся засорений из ФПЭ грубой очистки и своевременной замене ФПЭ тонкой очистки.

5. Результаты выполненных расчетов и проведенных экспериментов показывают более высокие значения перепадов давления для начальных участков по сравнению с конечными участками. Это объясняется лучшими условиями затекания потока в начальные участки, имеющие меньшую длину, а следовательно, меньшие газодинамические сопротивления.

#### Список литературы

1. Высокотехнологичные ГРП – путь к повышению надежности газораспределительных сетей / С. В. Густов [и др.] // Газ России. – 2010. – №4. – С. 56–60.
2. Hutten, I.M. Handbook of Nonwoven Filter Media / I.M. Hutten. – 2nd Edition. – Butterworth Heinemann, 2016. – 660 p.
3. Патент RU №131989U1. Многоблочная установка очистки природного газа от механических примесей / Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В. [и др.]. Оpubл. 10.09.2013. Бюл. № 25. Дата подачи заявки 24.12.2012.
4. Промышленное газовое оборудование: справочник. – 6-е изд., перераб. и доп. – Саратов: Газовик, 2013. – 1280 с.
5. Шур, И.А. Газорегуляторные пункты и установки / И.А. Шур. – Л.: Недра, 1985. – 288 с.
6. Усачев, А.П. Теоретические и прикладные основы повышения эффективности и безопасности эксплуатации установок грубой очистки природного газа от твердых частиц в системах газораспределения / А.П. Усачев, С.В. Густов, А.Л. Шурайц. – Саратов: СГТУ, 2013. – 172 с.
7. Чугаев, Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

#### References

1. High-Tech gas control points – a way to improve the reliability of gas distribution networks / S.V. Gustov [et al.] // Gas of Russia. – 2010. – No. 4. – P. 56–60.
2. Hutten, I.M. Handbook of Nonwoven Filter Media / I.M. Hutten. – 2nd Edition. – Butterworth Heinemann, 2016. – 660 p.
3. Patent RU No. 131989U1. Multi-Unit installation for natural gas purification from mechanical impurities / Usachev A. P., Shurayts A. L., Biryukov A.V. [et al.]. Published On 10.09.2013. Byul. No. 25. The application submission date is 24.12.2012.
4. Industrial gas equipment: reference book. – 6th ed., reprint. and additional. – Saratov: Gazovik, 2013. – 1280 p.
5. Shur, I.A. Gas control points and installations / I.A. Shur. – L.: Nedra, 1985. – 288 p.
6. Usachev, A.P. Theoretical and applied bases for improving the efficiency and safety of operation of installations for rough cleaning of natural gas from solid particles in gas distribution systems / A.P. Usachev, S.V. Gustov, A.L. Shurayts. – Saratov: SSTU, 2013. – 172 p.
7. Chugaev, R.R. Hydraulics / R.R. Chugaev. – 4th publ., add. and improved. – L.: Energoizdat, 1982. – 672 p.

УДК 698

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

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

**Аверкин Александр Григорьевич,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: algraw@mail.ru

**Леонтьев Виктор Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: tgv@pguas.ru

**Петрова Ксения Александровна,**  
магистрант кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»

*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 36-82-09

**Пономарева Инна Константиновна,**  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Бухгалтерский учет,  
налоги и аудит»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Eremkin Aleksander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Averkin Aleksandr Grigorievich,**  
Doctor of Sciences,  
Professor of the department «Heat, Gas  
Supply and Ventilation»  
E-mail: algraw@mail.ru

**Leontiev Victor Aleksandrovich,**  
Candidate of Sciences, Senior Lecture of the  
department «Heat, Gas Supply and  
Ventilation»  
E-mail: tgv@pguas.ru

**Petrova Kseniya Aleksandrovna,**  
Undergraduate of the department «Heat, Gas  
Supply and Ventilation»

*Penza State university*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
tel.: (8412) 36-82-09

**Ponomareva Inna Konstantinovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Accounting, Taxes and  
Audit»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ МЕСТНОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ СВЕЧЕЙ В ЗАЛЕ БОГОСЛУЖЕНИЯ

А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, В.А. Леонтьев, К.А. Петрова

Определены способы сохранности элементов оформления зала богослужения православных культовых сооружений. Систематизированы виды продуктов сгорания (дым, копоть, сажа, влага, углекислый газ и др.). Проведены тепловизионные съемки конвективных потоков при сгорании свечей и измерения температуры и скорости воздуха в конвективной струе. Определены участок устойчивого конвективного потока, а также место установки вытяжного зонта над горящими свечами и расстояние от пламени свечи до кромки низа зонта. Разработана местная вытяжная вентиляция с зонтами для улавливания и удаления вредных веществ из зала богослужения с верхней и нижней прокладкой магистрального воздуховода. Даны практические рекомендации по повышению эффективности работы местной вытяжной вентиляции и физико-химические особенности при использовании свечей в зале богослужения. Полученные результаты позволяют обеспечить сохранность убранства в зале богослужения и создать комфортные условия для прихожан и персонала.

*Ключевые слова:* зал богослужения, элементы оформления, свеча, пламя, вентиляция, продукты сгорания, конвективный поток, скорость и температура воздуха, вытяжной зонт

## THEORETICAL BASIS AND RECOMMENDATIONS FOR THE CREATION OF LOCAL EXHAUST VENTILATION OF CANDLE COMBUSTION PRODUCTS IN A WORSHIP HALL

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, V.A. Leontiev, K. A. Petrova

The methods of preservation of the elements of decoration of the hall of worship of Orthodox religious buildings have been determined. The types of combustion products (smoke, soot, moisture, carbon dioxide, etc.) are systematized. Thermal imaging surveys of convective flows during candle combustion and measurements of temperature and air velocity in the convective jet were carried out. The area of stable convective flow and the location of the exhaust hood above the burning candles and the distance from the candle flame to the edge of the bottom of the umbrella have been determined. Developed local exhaust ventilation with umbrellas for trapping and removing harmful substances from the worship hall with the upper and lower laying of the main air duct. Practical recommendations are given for improving the efficiency of local exhaust ventilation and physical and chemical characteristics when using candles in the hall of worship. The results obtained make it possible to ensure the safety of the decoration in the worship hall and create comfortable conditions for parishioners and staff.

*Key words: worship hall, decoration elements, candle, flame, ventilation, combustion products, convective flow, air speed and temperature, exhaust hood*

В православных церквях, храмах и соборах в качестве оформления и убранства в зале богослужения используются золочения, произведения зодчества, художественные росписи, иконы, фрески, станковая живопись, имеющие историческую и художественную ценности [1...4, 7]. При проведении ритуальных обрядов в зале богослужения осуществляется сжигание большого количества свечей (рис. 1).



Рис. 1. Иллюстрация горящих свечей на подсвечниках в зале богослужения в Храме святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г. Пензе

В результате неполного сгорания парафина и воска происходит выделение копоти, сажи, влаги, углекислого газа, которые воздушными потоками переносятся по залу и оседают на внутренней поверхности стен, элементах дорогостоящего оформления и убранства [5, 6]. С годами внутреннее убранство залов становится темным от копоти, сажи и влаги и имеет неприглядный внешний вид, что отрицательно сказывается на сохранности и способствует разрушению архитектурного наследия (рис. 2).



Рис. 2. Стена и убранства в Храме святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г. Пензе, покрытые копотью и сажей от горящих свечей и лампад

С целью обеспечения сохранности историко-культурных ценностей и создания комфортных условий в зале богослужения разработана инновационная система вытяжной вентиляции для улавливания и удаления вредных веществ в местах их образования при сгорании свечей в православных церквях, храмах и соборах. В данной системе предлагается применять для улавливания и удаления вредных веществ традиционные и разработанные авторами вытяжные зонты [13].

Предварительный анализ работы вытяжного зонта в натуральных условиях показал, что его конфигурация, размеры и высота зависят от целого ряда факторов: тепловой мощности конвективного потока при сгорании свечей; объема воздуха в конвективном потоке; скорости движения и температуры воздуха вблизи вытяжных зонтов в конвективном потоке; наличия внешнего движения воздуха в зале богослужения. Для определения значений температуры и скорости воздуха в конвективном потоке, необходимых для разработки местной вытяжной вентиляции [9...11], проведены экспериментальные исследования в натуральных условиях в Храме святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г. Пензе.

Параметры температуры в конвективном потоке  $t$ , °С, скорость воздуха  $v$ , м/с, расход воздуха  $L$ , м<sup>3</sup>/ч, определялись согласно ГОСТ 12.3.018-79 «Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний». В качестве средств измерения температуры и скорости воздуха в конвективном потоке и на периферии применялся термоанемометр типа ТКА-ПКМ(60), прибор комбинированный, прошедший государственную поверку.

Полученные экспериментальные данные приведены на рис. 3 а, б.

Из анализа графиков изменения  $t$ , °С, и  $v$ , м/с, по высоте  $h$  можно сделать вывод, что по высоте свечи от 0 до 20 см значения  $t$  и  $v$  изменяются незначительно. Резкое возрастание параметров  $t$  и  $v$  наблюдается на высоте  $h$  от 20 до 60 см над пламенем свечи. Далее  $t$  и  $v$  начинают снижаться, и на высоте  $h=60-100$  см приближается состояние окружающей среды. В данном случае конвективный поток от горящих свечей наиболее стабилен и компактен на высоте  $h$  до 60 см, что важно для установки и эффективности работы вытяжного зонта над подсвечником; допустимая высота  $h$  может составлять до 70 см.

Следовательно, вытяжной зонт необходимо устанавливать в зоне устойчивого конвективного потока, указанного в пределах от столешницы подсвечника до нижней кромки вытяжного зонта. Эти условия обеспечат эффективное улавливание и удаление вредных веществ при сгорании свечей из зоны богослужения за пределы помещения. Предлагаемые вытяжные зонты устанавливают в систему местной механической вытяжной вентиляции. Схема местной вытяжной вентиляции с верхней прокладкой магистрального воздуховода показана на рис. 4.

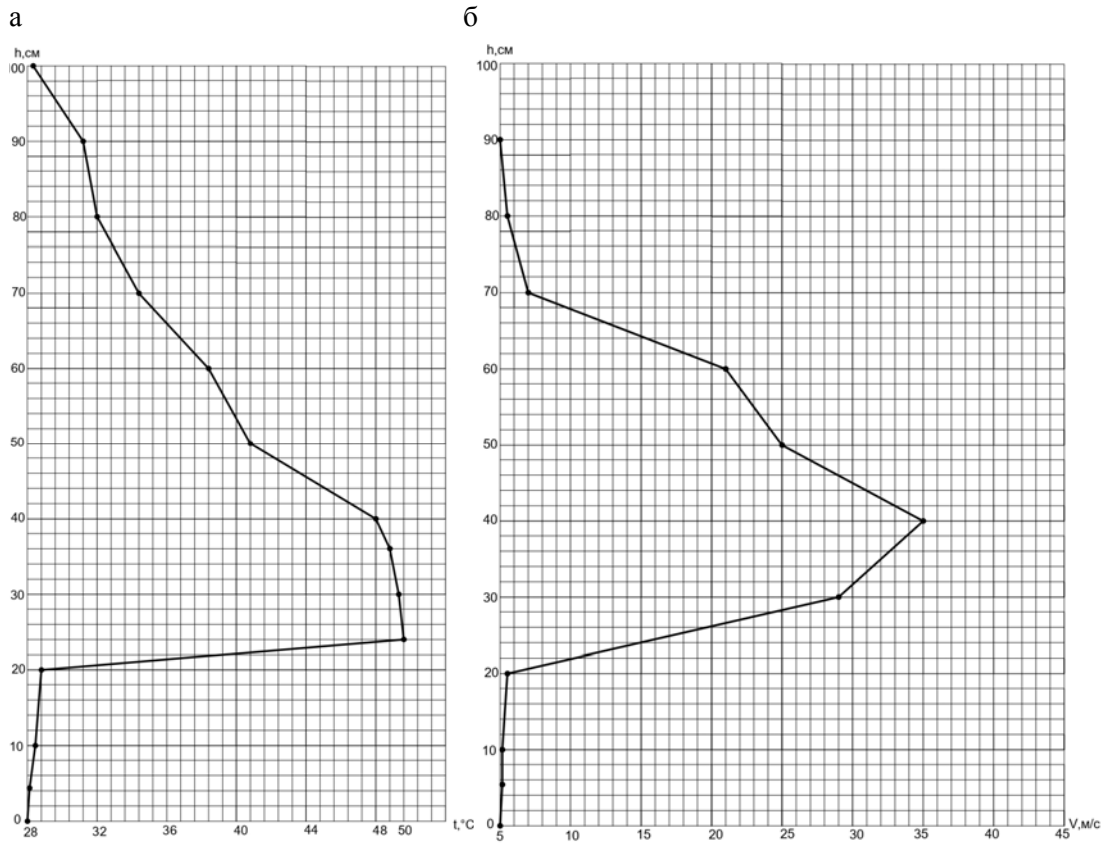


Рис. 3. График изменения температуры  $t, ^\circ\text{C}$ , воздуха (а) и скорости  $v, \text{м/с}$ , воздуха (б) по высоте  $h, \text{см}$ , конвективного потока от горящих свечей над подсвечником

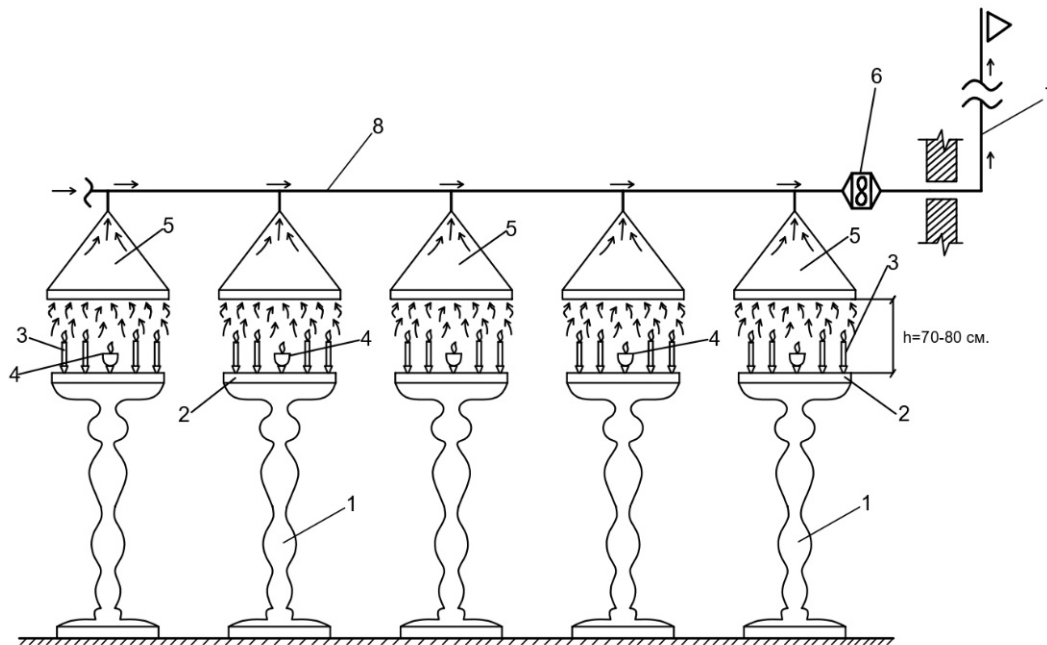


Рис. 4. Схема местной вытяжной системы вентиляции с использованием вытяжных зонтов и верхней прокладкой магистрального воздуховода:

1 – стойка подсвечника; 2 – столешня; 3 – свеча; 4 – лампада; 5 – вытяжной зонт; 6 – осевой вентилятор; 7 – выход загрязненного воздуха в атмосферу; 8 – магистральный воздуховод;  
 $h$  – расстояние от столешни до нижней кромки зонта

В указанной системе вентиляции (см. рис. 4) все подсвечники рекомендуется устанавливать в одну линию вдоль внутренней поверхности наружной стены зала богослужения на расстоянии, удобном и безопасном для прихожан. Выделяющиеся вредности при сгорании свечей и масла в лампаде из зонтов поступают в вытяжную систему магистрального воздуховода и далее с использованием осевого канального вентилятора удаляются в атмосферу через воздуховод, проложенный на наружной поверхности стены. Предлагаемая местная вытяжная система вентиляции обеспечит комфортные условия для прихожан и сохранит историко-культурное наследие и художественные ценности в зале богослужения церкви, храма и собора. Вытяжные зонты и воздуховоды должны быть художественно оформлены и иметь привлекательный внешний вид, а также не нарушать интерьер зала богослужения.

Предлагаемую систему вентиляции рекомендуется применять в существующих и построенных ранее церквях, храмах и соборах.

Для вновь строящихся, реставрируемых и восстанавливаемых ритуальных сооружений, имеющих подвалы, цокольные этажи, в стадии проектирования предлагается применять систему местной вытяжной вентиляции с нижней подпольной прокладкой магистрального воздуховода (рис. 5).

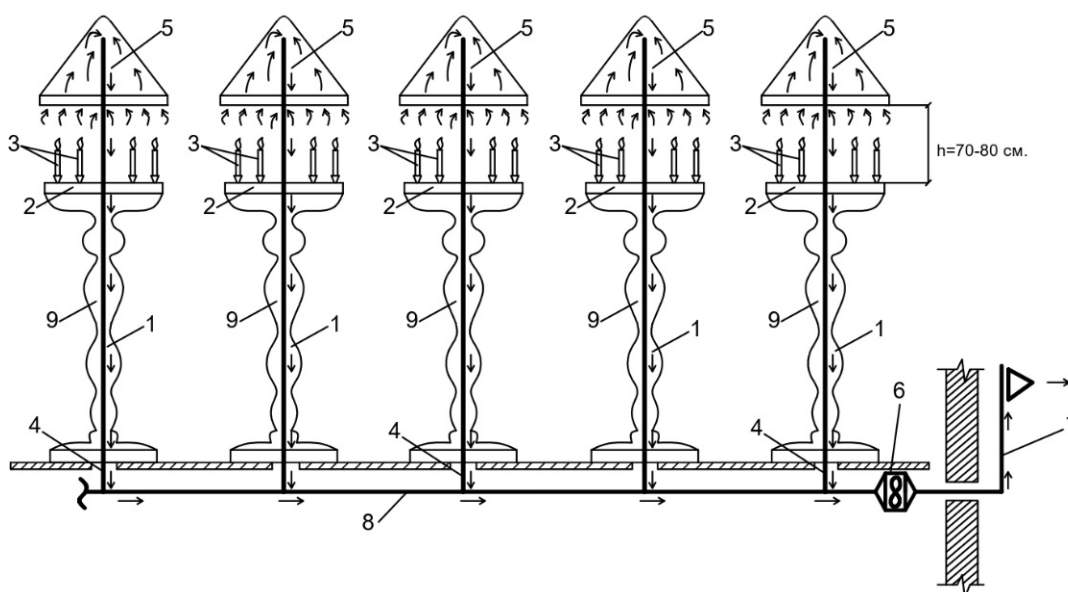


Рис. 5. Схема местной вытяжной системы вентиляции с использованием вытяжных зонтов и нижней прокладкой магистрального воздуховода:

- 1 – стойка подсвечника; 2 – столешня; 3 – свеча; 4 – отверстие в полу; 5 – вытяжной зонт;  
6 – осевой вентилятор; 7 – выход загрязненного воздуха в атмосферу; 8 – магистральный воздуховод; 9 – вытяжная труба внутри стойки подсвечника;  
 $h$  – расстояние от столешни до нижней кромки зонта

В данной системе вентиляции (см. рис. 5) подсвечники рекомендуется располагать вдоль внутренней поверхности наружной стены, окон на расстоянии 1,5 м друг от друга и от стены, обеспечивая свободный доступ прихожан к подсвечникам. В предлагаемом решении в необходимых местах установки подсвечников в полу зала богослужения делается отверстие для соединения вытяжной трубы, установленной в стойке подсвечника, с магистральным воздуховодом, проложенным под полом помещения. Вытяжная труба выходит выше столешни подсвечника и сверху укрывается зонтом в виде колпака для улавливания влаги, копоти и сажи от сгорания свечей. Конвективный воздушный тепловой поток поднимается вверх, упирается внутри в стенки зонта и за счет естественного или, при необходимости, искусственного давления отводится в вытяжную трубу и далее по магистральному воздуховоду удаляется

наружу. Эта система имеет привлекательный внешний вид и не нарушает интерьера зала богослужения.

Вытяжные зонты предлагается устанавливать над горящими свечами, размещенными на подсвечнике на расстоянии до 60-70 см, что обеспечивает свободное подтекание прилегающего воздуха к месту горения, пополнение конвективного потока и полное удаление продуктов сгорания. При проектировании и эксплуатации системы вытяжной вентиляции важно соблюдать и учитывать ряд технических требований [12, 13].

В случае если количество удаляемого зонтом воздуха  $L$ , м<sup>3</sup>/ч, будет меньше требуемого, то объем вытяжного зонта будет переполняться конвективным потоком и часть загрязненного воздуха вновь перетечет через нижнюю кромку зонта в зал богослужения. Известно, что на равномерность скорости всасывания в проеме отверстия вытяжного зонта влияет угол раскрытия, который не должен превышать 60 градусов. Для сохранения стабильности конвективного потока необходимо исключить в местах установки зонтов в зале богослужения влияние воздушных течений за счет открытия дверей, окон и вентиляционных потоков воздуха. Движение воздушных потоков в зале богослужения может отклонить конвективный поток, и по это причине загрязненный воздух из-под вытяжного зонта снова поступает в помещение. Следовательно, необходимо вытяжной зонт устанавливать там, где максимальные скорость, температура и устойчивость конвективного потока.

Важно, чтобы приемное отверстие вытяжного зонта располагалось непосредственно над подсвечником (см. рис. 4, 5) и соответствовало его конфигурации (круглая или прямоугольная форма). Площадь приемного отверстия зонта принимается несколько больше, чем площадь подсвечника, и определяется расчетом. При конструировании зонтов с механической вытяжкой с большим углом раскрытия необходимо учитывать, чтобы осевая скорость зонта была больше осевой скорости конвективного потока. У вытяжных зонтов с углом раскрытия 60 градусов скорости по оси зонта и по все всему сечению конвективного потока должны быть равными. Если расчет вытяжного зонта выполнен неточно и он переполняется загрязненным воздухом, то состояние воздушной среды в зале богослужения не улучшается и работа местной вытяжной вентиляции становится неэффективной.

Наряду с применением местной вытяжной вентиляции для борьбы с дымом, копотью и сажой, необходимо дополнительно использовать физические и химические свойства и процессы при горении свечей. Для снижения количества выделяющихся вредных веществ важно учитывать состав и свойства, а также качество производства свечей. Наблюдения за горением свечей показали, что свеча делится на четыре условные части: твердый воск, жидкий воск, фитиль и пламя. Горящее пламя свечи расплавляет верхний слой воска и образует жидкую каплю в верхней части свечи. Связующим звеном между расплавленной каплей и пламенем является фитиль, который за счет капиллярных сил подает расплавленный воск в зону горения. Известно, что копоть от горячей свечи зависит от размера фитиля. При толстом фитиле в пламя подается избыток расплавленного воска. Несгоревшая часть воска поднимается вверх в виде дыма, копоти и сажи. Если фитиль будет слишком тонкий, он не будет успевать подавать расплавленный воск в зону горения, тогда воск будет стекать по свечи вниз [6, 8].

Копоть и сажа – это неизменный продукт горения, который образуется в результате неполного разложения углеродов, при этом углероды превращаются в газовую субстанцию, которая оседает на золочении, живописи, иконах, фресках, станковой живописи, имеющих историческую и художественную ценность [8].

Исследования в зале богослужения в Храме святых первоверховных апостолов Петра и Павла и Спасском кафедральном соборе в г. Пензе показали, что необходимо принимать меры для исключения сквозняков и высокой подвижности воздуха в помещениях, где горят свечи. При высокой подвижности воздуха в фитиль попадает меньшее количество воска или парафина. Когда его недостаточно, пламя затихает, а если слишком много – разрастается сильнее, и тогда пламя неспособно переработать весь углерод, в результате увеличивается количество дыма, копоти и сажи. Если не удается избавиться от сквозняков и уменьшить подвижность воздуха в зоне горения



свечей, то идеальным решением будет использование специальных вазочек для свечей с отверстиями по бокам для подачи воздуха для горения [6, 8].

Известен другой способ, когда предлагается укорачивать часть фитиля, чтобы он не возвышался над воском более 6 мм. Горящая свеча будет гореть ровным и приятным светом и выделять меньше копоти и сажи [6,8].

Практика показывает, что при «задувании» свечи воздухом она начинает дымить и коптить; чтобы потушить свечу, лучше использовать специальные колпачки, при этом не будут выделяться дым и копоть.

Для производства свечей с большим диаметром специалисты рекомендуют использовать несколько фитилей, которые быстро растапливают воск или парафин, и копоти выделяется меньше.

При соблюдении указанных выше рекомендаций несколько сокращаются выделения вредных веществ при сгорании свечи, однако количество дыма, копоти, сажи и влаги остается значительным, и требуется их дополнительное механическое удаление с помощью системы вытяжной вентиляции.

Наряду с традиционными восковыми свечами, в ряде зарубежных храмов и соборов применяются электрические свечи со светодиодным пламенем, позволяющие исключить возможность выделения вредных веществ и уберечь убранство от копоти и сажи. При современных технических достижениях можно предусмотреть дистанционное включение электрической свечи. Это современно, однако неприменимо в православных храмах.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать инновационную местную вытяжную систему вентиляции с использованием вытяжных зонтов для улавливания и удаления вредных веществ в местах их образования при сгорании свечей на подсвечниках и обеспечения сохранности убранства зала богослужения, а также создания комфортных условий для прихожан и персонала православных церквей, храмов и соборов.

### Список литературы

1. АВОК. Стандарт-2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: отраслевой стандарт: дата введения НП «АВОК» 09.06.04. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004. – 14с.
2. СП 31-103–99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов / Госстрой России. – М.: АХЦ «Арххрам», ГУП ЦПП, 2000.
3. ГОСТ 12.3.018. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – М.: Госстандарт СССР, 1979.
4. МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т.2. Православные храмы и комплексы / Архитектурно-художественный центр Московской Патриархии; составитель М.Ю. Кеслер. – М.: Технорматив, 2008. – 194с.
5. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов: монография / А.Г. Кочев; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2004. – 449с.
6. Чем дышат храмы? Благовест. – URL: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramu>, свободный – (11.01.2021).
7. СП 391.132.5800. 2017. Храмы православные. Правила проектирования / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – М., 2018.
8. Еремкин, А.И. Анализ использования гибридных систем создания и поддержания искусственного микроклимата в православных соборах и храмах / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К. Петрова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 4. – С. 158–167.
9. Еремкин, А.И. Анализ и способы обеспечения микроклимата в православных соборах и храмах / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, А.Г. Багдасарян // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 4. – С. 151–158.

10. Еремкин, А.И. Особенности применения вытесняющей вентиляции в системах кондиционирования воздуха в залах богослужения православных соборов и храмов / А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2. – С. 151–158.

11. Еремкин, А.И. Методика расчета воздухообмена системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 161–168.

12. Еремкин, А.И. Пути повышения качества микроклимата в зале богослужения Спасского кафедрального собора г. Пензы / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова, А.Г. Багдасарян // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 125–136.

13. Еремкин, А.И. Совершенствование устройств тепловлажностной обработки воздуха и методов расчета климатехники / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин. – М.-Вологда: ИНФРА-Инженерия, 2019. – 186 с.

### References

1. AVOK. Standard–2-2004. Orthodox churches. Heating, ventilation and air conditioning: industry standard: date of introduction of NP «AVOK» 09.06.04. – Moscow: AVOK-PRESS, 2004. – 14 p.

2. SP 31-103–99. Buildings, structures and complexes of Orthodox churches / Gosstroy of Russia. – М.: АНТс «Arkhkhram», GUP TsPP, 2000.

3. GOST 12.3.018. Occupational safety standards system. Ventilation systems. Aerodynamic test methods. – М.: Gosstandart USSR, 1979.

4. MDS 31-9.2003. Orthodox churches. T.2. Orthodox churches and complexes / Architectural and Art Center of the Moscow Patriarchate; compiled by M.Yu. Kesler. – Moscow: Tekhnormative, 2008. – 194 p.

5. Kochev, A.G. Microclimate of Orthodox churches: monograph / A.G. Kochev; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2004. – 449 p.

6. How can temples breathe? Blagovest. – URL: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>, free – (01/11/2021).

7. SP 391.132.5800.2017. Orthodox churches. Design rules. / Ministry of construction and housing and communal services of the Russian Federation. – М., 2018.

8. Eremkin, A.I. Analysis of the use of hybrid systems for creating and maintaining an artificial microclimate in Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K. Petrova // Education and Science in the Modern World. Innovation. – 2020. – No. 4. – P. 158–167.

9. Eremkin, A.I. Analysis and methods of providing a microclimate in Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, A.G. Bagdasaryan // Education and Science in the Modern World. Innovation. – 2020. – No. 4. – P. 151–158.

10. Eremkin, A.I. Features of the use of displacement ventilation in air conditioning systems in the halls of worship of Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 2. – P. 151–158.

11. Eremkin, A.I. Methodology for calculating the air exchange of the displacing type air conditioning system in the halls of worship of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3. – P. 161–168.

12. Eremkin, A.I. Ways to improve the quality of the microclimate in the worship hall of the Spassky Cathedral in Penza / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova, A.G. Bagdasaryan // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 4. – P. 125–136.

13. Eremkin, A.I. Improvement of devices for heat and humidity treatment of air and methods for calculating climatic engineering / A.I. Eremkin, A.G. Aeverkin. – М.-Vologda: INFRA-Engineering, 2019. – 186 p.

УДК 621.311.212:627.8

*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

**Королева Тамара Ивановна**,  
кандидат экономических наук,  
профессор кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»

E-mail: korolevatamara@mail.ru

*Филиал «Сурский гидроузел» ФГБВУ  
«Центррегионводхоз»*

**Шербакова Вера Владимировна**,  
главный экономист

E-mail: gidrouzelpnz@yandex.ru

*Московский государственный университет  
технологий и управления (ПКУ),  
Пензенский филиал*

**Каледа Ирина Анатольевна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Пожарная безопасность»

E-mail: kaleda-qts@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

**Koroleva Tamara Ivanovna**,  
Candidate of Economic Sciences, Professor  
of the Department «Heat, Gas Supply and  
Ventilation»

E-mail: korolevatamara@mail.ru

*Branch «Sursky gidrouzel» FGBVU  
«Centregionvodhoz»*

**Shcherbakova Vera Vladimirovna**,  
Chief economist

E-mail: gidrouzelpnz@yandex.ru

*Moscow State University of Technology and  
Management (PKU), Penza Branch*

**Kaleda Irina Anatolyevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Fire Safety»

E-mail: kaleda-qts@yandex.ru

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ

Т.И. Королева, В.В. Шербакова, И.А. Каледа

Рассматривается повышение надежности и эффективности комплексных гидроузлов при использовании малых ГЭС. На таких гидроузлах из-за перераспределения речного стока по времени обеспечивают надежное водоснабжение, орошение, защиту от наводнений, работу водного транспорта, а надежность работы энергосистемы повышают снижением в ней пиковых нагрузок.

Энергия водного потока относится к возобновляемым источникам энергии. Высокоманевренные гидроагрегаты ГЭС обеспечивают надежность энергоснабжения в случае аварий, а также экономичную работу тепловых и атомных станций.

В ФГБУ «Сурский гидроузел» на основе получения электроэнергии от малой ГЭС разработаны инженерные решения, актуальные для систем водного хозяйства населенных пунктов и территориально-промышленных комплексов, включающих сооружения и устройства получения воды из природных источников. К ним относится использование при эксплуатации водозаборов и гидротехнического оборудования гидроузла электрообогрева и барбатажа в пространстве перед затворами. Эти решения повышают технико-экономическую эффективность и надежность систем водного хозяйства городов.

*Ключевые слова: технико-экономическая эффективность, надежность, водоснабжение, защита от наводнений, гидроузлы, малые ГЭС, инженерные решения, гидроэнергетика, возобновляемая энергия, бюджетные средства*

## TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF WATER MANAGEMENT SYSTEMS OF POPULATED PLACES

T.I. Koroleva, V.V. Shcherbakova, I.A. Kaleda

The increase in the reliability and efficiency of complex hydrosystems when using small hydroelectric power plants is discussed in the article. Due to the redistribution of river runoff over

time, such hydrosystems provide reliable water supply, irrigation, flood protection, operation of water transport. The reliability of the power system is increased by reducing peak loads in it.

The energy of the water flow belongs to renewable energy sources. Highly maneuverable hydroelectric units of HPPs ensure the reliability of power supply in case of accidents and ensure the most economical operation of thermal and nuclear power stations.

At the FSBI «Sursky hydroelectric complex», on the basis of generating electricity from a small hydroelectric power station, engineering solutions have been developed that are relevant to the water management systems of settlements and territorial industrial complexes, including structures and devices for obtaining water from natural sources. These include the use of electric heating and bubbling in the space in front of the gates during the operation of water intakes and hydraulic equipment. These solutions increase the technical and economic efficiency and reliability of water management systems in cities.

*Keywords: reliability, water supply, flood protection, hydropower stations, small hydropower stations, engineering solutions, hydropower, renewable energy, economic efficiency, budget funds*

### Введение

Гидроузлы на средних реках Российской Федерации решают большой комплекс задач. Как правило, созданные ими водохранилища регулируют речной сток во времени, создавая условия для надежного хозяйственно-питьевого, производственного и противопожарного водоснабжения; орошения; защиты территорий от подтоплений и наводнений; рыбоводства; организации рекреаций, водного спорта и туризма. Такие объекты имеют важное хозяйственное и экологическое значение, обладают инвестиционной привлекательностью.

Однако часто гидроузлы возводятся на значительном удалении от населенных пунктов, линий электропередач, что создает трудности при их строительстве и эксплуатации, сдерживает привлечение высококвалифицированных кадров, применение современных технологий эксплуатации, особенно в зимнее время, гидротехнического оборудования и водозаборов. По опыту многих зарубежных стран, преодоление означенных недостатков возможно при строительстве малых ГЭС.

Россия занимает второе место в мире (после Китая) по обеспеченности гидроэнергетическими ресурсами. По последним данным, теоретический (валовый) гидроэнергетический потенциал России оценивается почти в 2900 млрд кВт·ч в год (это почти 170 тыс. кВт·ч на 1 кв. км территории). По расчетам экспертов, технически возможный гидроэнергетический потенциал российских рек составляет более 1660 млрд кВт·ч. Этот показатель в полной мере покрывает объем энергопотребления страны, даже превышает его почти в полтора раза (хотя по факту действующими ГЭС он используется только на 10,5 %) [2, 3]. Увеличение использования гидроэнергетического потенциала в нашей стране возможно при строительстве малых ГЭС.

Себестоимость производства электроэнергии на ГЭС значительно (порой в 5-6 раз) ниже, чем на тепловых и атомных электростанциях, что может способствовать снижению тарифов на электроэнергию для потребителей.

Высокоманевренные гидроагрегаты ГЭС и ГАЭС, покрывая пиковую часть графиков нагрузки, где электроэнергия наиболее дорогая, обеспечивают надежность энергоснабжения в случае аварий и экономичную работу тепловых и атомных станций.

### Материалы и методы исследования

В Пензенской области малые ГЭС вносят свой вклад в развитие гидроэнергетики. Здесь в 40-50-х годах прошлого века во время реализации планов преобразования природы и сельской электрификации были построены десятки русловых и балочных плотин, использующих напоры на них для получения электроэнергии. Большинство таких плотин имели незначительные напоры, были построены без водосбросов и просуществовали несколько лет. После завершения строительства в 1977 году Сурского гидроузла с плотинным водозабором у села Засечное в Пензенском районе появилась возможность вернуться к идеи использования гидроэнергетического потенциала.

В 2004 году была введена в эксплуатацию малая ГЭС, находящаяся в ведении Федерального государственного бюджетного учреждения «Сурский гидроузел». Она

полностью покрывает потребность учреждения в электроэнергии и позволяет получить небольшой, но стабильный дополнительный доход (табл.1). При этом внедрены и продолжают совершенствоваться технологии надежной эксплуатации подъемного оборудования затворов, защиты их от обмерзания; методы натуральных наблюдений за состоянием сооружений гидроузла.

Т а б л и ц а 1

Выработка электроэнергии малой ГЭС ФГУ «Сурский гидроузел»  
за последние пять лет

Выработано в 2015 году, кВт·ч	Всего, из них:	1 076 456
	На собственные нужды	411 803
	Излишки на продажу	664 653
Выработано в 2016 году, кВт·ч	Всего, из них:	1 164 253
	На собственные нужды	540 065
	Излишки на продажу	624 188
Выработано в 2017 году, кВт·ч	Всего, из них:	969 278
	На собственные нужды	520 510
	Излишки на продажу	448 768
Выработано в 2018 году, кВт·ч	Всего, из них:	1 155 055
	На собственные нужды	572 836
	Излишки на продажу	582 219
Выработано в 2019 году, кВт·ч	Всего, из них:	1 150 000
	На собственные нужды	590 454
	Излишки на продажу	559 546

В свое время на строительство малой ГЭС Сурского гидроузла было затрачено 8 946,3 тыс. руб. (96,4 тыс. руб. – разработка рабочего проекта (2002 год), 8 849,9 тыс. руб. – выполнение самих работ (2003 год)). В ценах 2019 года стоимость строительства составила примерно 24 657,1 тыс. руб. (соответственно, 301,2 тыс. руб. – проект и около 24 355,9 тыс. руб. – строительство).

Так как учреждение практически не покупает электроэнергию у сторонних организаций, то при средних ценах 1 кВт·ч за соответствующий период поставки (средняя цена гарантирующего поставщика электроэнергии) только за последние 5 лет общая сумма экономии бюджетных средств составила около 20,070 млн руб. (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Потребность ФГУ «Сурский гидроузел» в дополнительном финансировании  
при отсутствии электроэнергии, выработанной собственными силами

Год	Необходимое количество э/энергии, кВт·ч	Средняя цена за 1 кВт·ч, руб.	Сумма, руб.
2015 г.	411 803,00	5,11	2 104 313,33
2016 г.	540 065,00	6,36	3 434 813,40
2017 г.	520 510,00	7,08	3 685 210,80
2018 г.	572 836,00	8,42	4 823 279,12
2019 г.	590 454,00	10,20	6 022 630,80
Итого			20 070 247,45

При этом за последние пять лет от реализации излишков выработанной электроэнергии учреждение получило около 5 170,00 млн руб. (табл. 3).

Был бы выгоден этот проект с точки зрения его экономической эффективности? Для получения однозначного ответа произведем необходимые расчеты с помощью общеизвестных методов. Данные методы оценки эффективности инвестиционных проектов в научной литературе разделяют на 2 группы: статистические и динамические.

Выручка от продажи электроэнергии за период 2015-2019 гг.

Год	Количество реализованной э/энергии, кВт·ч	Цена за 1 кВт·ч, руб.	Выручка, руб.
2015	274 201,00	1,50	411 301,50
	389 666,00	1,80	701 398,80
	786,00	2,00	1 572,00
Итого	664 653,00		1 114 272,30
2016	260 716,00	1,80	469 288,80
	359 446,00	1,90	682 947,40
	4 026,00	2,00	8 052,00
Итого	624 188,00		1 160 288,20
2017	448 768,00	1,75	785 344,00
2018	582 219,00	1,75	1 018 883,25
2019	559 546,00	1,95	1 091 114,70
Всего			5 169 902,45

### Основная часть

Самый простой класс подходов к анализу отдельных инвестиционных проектов и инвестиций в целом – статистические методы. При простоте алгоритмов расчета инвестор, благодаря им, в состоянии уже сделать определенные первоначальные выводы по объектам инвестиций. Неэффективные объекты после проведения расчетов такими методами можно сразу исключить из рассмотрения.

Об экономической эффективности проекта часто судят по сроку окупаемости. Экономический смысл срока окупаемости отдельных инвестиций или инвестиционного проекта в целом заключается в определении периода времени, за который вложенные деньги (капитал) инвестор вернет себе обратно.

Если в качестве инвестора мы рассматриваем государство (средства федерального бюджета), то в формулах расчета срока окупаемости будем использовать понятие «бюджетные средства». Таким образом, формула расчета срока окупаемости инвестиций будет иметь вид:

$$PP = \min n, \quad (1)$$

где  $\min n$  – минимальное значение периода эксплуатации объекта, при котором выполняется неравенство

$$\sum_{i=1}^n CF_i > IC;$$

здесь  $IC$  (*Invest Capital*) – первоначальные затраты государства на строительство малой ГЭС;  $CF$  (*Cash Flow*) – созданный использованием малой ГЭС денежный поток.

Результаты расчетов по неравенству приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Срок окупаемости инвестиционного проекта (Payback Period)

Денежный поток на каждый период, $CF$ , руб.		5 001 322,13
Период, $T$ , год	Первоначальные затраты, $IC$ , руб.	Денежный поток нарастающим итогом, $CF$ , руб.
1	24 657 100,00	5 001 322,13
2	24 657 100,00	10 002 644,26
3	24 657 100,00	15 003 966,39
4	24 657 100,00	20 005 288,52
5	24 657 100,00	25 006 610,65
6	24 657 100,00	30 007 932,78
7	24 657 100,00	35 009 254,91
8	24 657 100,00	40 010 577,04
9	24 657 100,00	45 011 899,17
10	24 657 100,00	50 013 221,30

Из табл. 4 видно, что неравенство выполняется по прошествии 5 лет, следовательно, срок возврата вложенных инвестором денег равен 5 годам.

Формула расчета срока/периода окупаемости иногда расписывается по-другому. В отечественной финансовой литературе часто встречается такой вариант:

$$PP = \frac{\text{Затраты на инвестиции}}{\text{Денежный поток}} \quad (2)$$

В данном случае следует отметить, что под затратами на инвестиции понимаются все издержки государства при вложении в строительство.

Денежный поток необходимо учитывать за определенные периоды (день, неделя, месяц, год). В зависимости от выбранной шкалы измерения мы получим аналогичный период окупаемости строительства.

В нашем случае затраты на строительство малой ГЭС Сурского гидроузла составили 24 657,1 тыс. руб. Поскольку проект осуществлялся 15 лет назад, а данные о денежных потоках имеются только за последние 5 лет, найдем средний денежный поток на каждый год. Для чего суммируем по каждому году выручку от продажи электроэнергии сторонним потребителям с суммой сэкономленных бюджетных средств при потреблении выработанной электроэнергии на собственные нужды. Среднее значение полученных величин даст нам денежный поток за год. Результаты вычислений представлены в табл.5.

Т а б л и ц а 5

Денежный поток, созданный объектом инвестиций, руб.

Год	Выручка от продажи э/энергии	Сумма экономии (на собственные нужды)	Итого
2015	1 114 272,30	2 104 313,33	3 218 585,63
2016	1 160 288,20	3 434 813,40	4 595 101,60
2017	785 344,00	3 685 210,80	4 470 554,80
2018	785 344,00	4 823 279,12	5 608 623,12
2019	1 091 114,70	6 022 630,80	7 113 745,50
Денежный поток на каждый год (средний)			5 001 322,13

Срок окупаемости по формуле (2):

$$PP = 24657100,00 : 5\,001\,322,13 = 4,93 \text{ года.}$$

Округлив полученное значение, получим сходный с расчетом по формуле (1) результат, равный 5 годам.

Коэффициент рентабельности инвестиций или инвестиционного проекта  $ARR$  – показатель, отражающий прибыльность строительства малой ГЭС без учета дисконтирования, – вычислим по формуле

$$ARR = \frac{CF_{cp.}}{IC} \quad (3)$$

где  $CF_{cp.}$  – средний денежный поток (чистая прибыль) от эксплуатации малой ГЭС за рассматриваемый период (месяц, год);  $IC$  (*Invest Capital*) – бюджетные вложения, первоначальные затраты федерального бюджета, в объект вложения.

Результаты расчетов, выполненных по формуле (3), приведены в табл. 6.

Таким образом, используя статистические методы оценки инвестиционных проектов, мы получили первые данные: срок окупаемости – 5 лет, коэффициент рентабельности – 20,3 %.

Рентабельность вложения бюджетных средств в строительство малой ГЭС  
Сурского гидроузла

Период (год), T	Затраты бюджета, IC, руб.	Денежный поток, CF, руб.
2015	24 657 100,00	3 218 585,63
2016	-	4 595 101,60
2017	-	4 470 554,80
2018	-	5 608 623,12
2019	-	7 113 745,50
<i>ARR</i>		20,2835 %

Теперь рассмотрим ряд динамических методов оценки инвестиционных проектов с использованием показателя дисконтирования.

Чистый дисконтированный доход *NPV* в нашем случае – показатель, отражающий изменение полученной прибыли от эксплуатации ГЭС. Он показывает разность между вложенными денежными средствами и расходами. Используем формулу

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CF_0, \quad (4)$$

где *NPV* – чистая дисконтированная прибыль от эксплуатации ГЭС; *CF<sub>t</sub>* – денежный поток в период времени *t*; *CF<sub>0</sub>* – денежный поток в начале строительства. Данный поток равняется в нашем случае бюджетным вложениям (*CF<sub>0</sub> = IC*); *r* – ставка дисконтирования (барьерная ставка).

Результаты расчетов по формуле (4) содержатся в табл. 7. Поскольку у нас имеются данные только за последние пять лет, величину денежного потока за другие периоды примем равной среднегодовой величине, представленной в табл. 5.

## Расчет чистой дисконтированной прибыли от эксплуатации ГЭС

Ставка дисконтирования, <i>r</i> = 10 %			
Период (год), <i>T</i>	Бюджетные затраты, <i>IC</i> , руб.	Создаваемый денежный поток, <i>CF</i> , руб.	Дисконтированный денежный поток, руб.
0	24 657 100,00		
1	-	5 001 322,13	4 546 656,48
2	-	5 001 322,13	4 133 324,07
3	-	5 001 322,13	3 757 567,34
4	-	5 001 322,13	3 415 970,31
5	-	5 001 322,13	3 105 427,55
6	-	5 001 322,13	2 823 115,96
7	-	5 001 322,13	2 566 469,05
8	-	5 001 322,13	2 333 153,68
9	-	5 001 322,13	2 121 048,80
10	-	3 218 585,63	1 240 904,09
11	-	4 595 101,60	1 610 555,08
12	-	4 470 554,80	1 424 456,53
13	-	5 608 623,12	1 624 618,34
14	-	7 113 745,50	1 873 271,53
<i>NPV</i> =			11 919 438,82
ЧПС=			11 919 438,82



В табл. 7 дополнительно приведены результаты расчета, выполненного другим способом, – с использованием встроенной формулы ЧПС. Результаты расчетов совпадают.

Если  $NPV < 0$ , то инвестиционный проект (в нашем случае – строительство) следует исключить из рассмотрения. При  $NPV = 0$  считают, что строительство ГЭС обеспечит уровень безубыточности, когда все доходы равны расходам. Если  $NPV > 0$  (как в нашем случае) – строительство малой ГЭС Сурского гидроузла привлекательно для вложения.

Индекс прибыльности вложения инвестиций (в нашем случае – бюджетных средств) – показатель эффективности строительства объекта, характеризующий отдачу (доходность) вложенных средств федерального бюджета. Индекс прибыли представляет собой отношение дисконтированной стоимости будущих денежных потоков к стоимости первоначальных бюджетных вложений. Экономический смысл данного коэффициента – это оценка дополнительной ценности на каждый вложенный (в нашем случае – бюджетный) рубль. Формула для расчета

$$PI = \frac{NPV}{IC} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{IC}, \quad (5)$$

где  $NPV$  – чистый дисконтированный доход;  $n$  – срок реализации строительства;  $r$  – ставка дисконтирования (%);  $IC$  – вложенные (затраченные) бюджетные средства.

Результаты расчетов по формуле (5) представлены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

## Расчет индекса прибыльности (Profitability Index)

Ставка дисконтирования, $r=10\%$			
Период (год), $T$	Затраты федерального бюджета, $IC$ , руб.	Создаваемый денежный поток, $CF$ , руб.	Дисконтированный денежный поток
0	24 657 100,00		
1	-	5 001 322,13	4 546 656,48
2	-	5 001 322,13	4 133 324,07
3	-	5 001 322,13	3 757 567,34
4	-	5 001 322,13	3 415 970,31
5	-	5 001 322,13	3 105 427,55
6	-	5 001 322,13	2 823 115,96
7	-	5 001 322,13	2 566 469,05
8	-	5 001 322,13	2 333 153,68
9	-	5 001 322,13	2 121 048,80
10	-	3 218 585,63	1 240 904,09
11	-	4 595 101,60	1 610 555,08
12	-	4 470 554,80	1 424 456,53
13	-	5 608 623,12	1 624 618,34
14	-	7 113 745,50	1 873 271,53
$NPV=$			11 919 438,82
$PI=$			48,34

При  $PI < 1$  строительство ГЭС не сможет возместить в полном размере вложенные в него бюджетные затраты, при  $PI = 1$  строительство имеет доходность, равную выбранной ставке дисконтирования, а если  $PI > 1$  (как в нашем случае), проект является инвестиционно привлекательным, поскольку при дальнейшей эксплуатации ГЭС сможет обеспечить дополнительную прибыль.

**Вывод**

Таким образом, произведя расчеты, можно с уверенностью констатировать, что вложение в строительство малой ГЭС Сурского гидроузла бюджетных средств было экономически выгодно. Помимо этого было решено много других проблем: произведено техническое усовершенствование оборудования для повышения надежности работы гидроузла; государство сэкономило почти 20,0 млн руб. расходов на покрытие потребности учреждения на приобретение электроэнергии, а само учреждение получило дополнительный доход (свыше 5,00 млн руб.), который используется для удовлетворения необходимых, подчас срочных и непредвиденных, нужд. Отметим, что из полученной выручки выплачивается стимулирующая надбавка работникам, принимающим участие в приносящей доход деятельности, что, несомненно, положительно влияет на работу учреждения, стимулируя его работников и повышая их заработную плату, а с полученной прибыли отчисляются налоги, что также является положительным моментом в формировании соответствующего бюджета.

Удачный опыт ФГУ «Сурский гидроузел» в сфере развития малой гидроэнергетики можно использовать и в других регионах России. Помимо этого, у самого учреждения в связи с введением в эксплуатацию нового объекта энергоснабжения появилась дополнительная потребность в электроэнергии, а разработанный в свое время проект на строительство позволяет установить еще один агрегат для выработки электроэнергии. Установку дополнительного агрегата можно провести за счет бюджетных средств или с привлечением частного капитала, поскольку налицо его высокая экономическая эффективность.

**Список литературы**

1. Возобновляемая энергия: Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Возобновляемая энергия](https://ru.wikipedia.org/wiki/Возобновляемая_энергия) (дата обращения: 03.04.2020).
2. Структура гидроэнергетического сектора России / Ассоциация «Гидроэнергетика России». – URL: <http://www.hydropower.ru/assotsiatsiya/struktura-gidroenergeticheskogo-sektora-rossii/> (дата обращения: 01.04.2020).
3. Каковы перспективы развития гидроэнергетики в России и в мире? // Аргументы и факты: электронный журнал. – URL: <https://aif.ru/dontknows/1236236> (дата обращения: 01.04.2020).
4. Королева, Т.И. Оценка эффективности использования энергосберегающих мероприятий при переходе на автономный источник теплоты / Т.И. Королева, В.В. Салмин, Е.Г. Ежов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1 (12). – С.154–161.

**References**

1. Renewable energy: Wikipedia. Free encyclopedia. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Renewable energy](https://ru.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy) (date of access: 03/04/2020).
2. The structure of the hydropower sector in Russia / Association «Hydropower of Russia». – URL: <http://www.hydropower.ru/assotsiatsiya/struktura-gidroenergeticheskogo-sektora-rossii/> (date of access: 01.04.2020).
3. What are the prospects for the development of hydropower in Russia and in the world? // Arguments and Facts: Electronic journal. – URL: <https://aif.ru/dontknows/1236236> (date of access: 01.04.2020).
4. Koroleva, T.I. Evaluation of the efficiency of using energy-saving measures in the transition to an autonomous heat source / T.I. Koroleva, V.V. Salmin, E.G. Yezhov // Regional architecture and construction. – 2012. – No. 1 (12). – P.154–161.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 72.01

*Академия строительства и архитектуры  
самарского государственного технического  
университета*

443001, Россия, г. Самара,  
ул. Молодогвардейская, 194

**Каракова Татьяна Владимировна,**  
профессор РАН, доктор архитектуры,  
зав.кафедрой «Дизайн»  
E-mail: t.karakowa@mail.ru

**Данилова Анастасия Вадимовна,**  
аспирант кафедры дизайн, инженер НИС  
кафедры «Дизайн»  
E-mail: n\_Anastasiya163@list.ru

*Academy of construction and architecture of  
Samara state technical University*

443001, Russia, Samara,  
194, Molodogvardeyskaya St.

**Karakova Tatyana Vladimirovna,**  
Professor of the Russian Academy of Sciences,  
Doctor of Architecture, Head of the  
department «Design»  
E-mail: t.karakowa@mail.ru

**Danilova Anastasia Vadimovna,**  
Postgraduate student, Engineer of the NIS  
of the department «Design»  
E-mail: n\_Anastasiya163@list.ru

## ХУДОЖЕСТВЕННАЯ ПЕРФОРАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ЭМЕРДЖЕНТНОСТИ СИСТЕМЫ\*

Т.В. Каракова, А.В. Данилова

Анализируется роль художественной перфорации в формировании современных подходов к проектированию общественных зданий как ключевых объектов городской среды, несущих уникальный образ и символические смыслы, корреспондирующие с национальными и региональными особенностями места, с его исторической семиотической системой. Авторы рассматривают современный этап архитектуры как сложный симбиоз технических возможностей стилевых и технологических направлений, возникших в рамках деконструктивизма, и актуализированной проблематики создания аутентичного, инвестиционно-привлекательного городского образа. Художественная перфорация выступает в качестве важнейшего инструментария формообразования архитектуры общественного здания, позволяя получить системный эффект созданного объекта архитектурного творчества как результат выхода на новый качественный уровень с уникальными классификационными характеристиками. Приведенные в статье примеры архитектурных объектов дифференцированы по степени эффекта эмерджентности.

*Ключевые слова: эмерджентность, художественная перфорация, деконструктивизм, композиция, постмодернизм*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-312-90005.

---

## ARTISTIC PERFORATION AS A TOOL FOR FORM MAKING OF THE ARCHITECTURE OF A PUBLIC BUILDING IN THE CONTEXT OF SYSTEM EMERGENCE\*

T.V. Karakova, A.V. Danilova

The article analyzes the role of artistic perforation in the formation of modern approaches to the design of public buildings as key objects of the urban environment, bearing a unique image and symbolic meanings that correspond to the national and regional characteristics of the place, with its historical semiotic system. The authors consider the modern stage of architecture as a complex symbiosis of the technical capabilities of style and technology trends that emerged within the framework of deconstructivism, and the updated problem of creating an authentic, investment-attractive urban image. Artistic perforation acts as the most important tool for shaping the architecture of a public building, allowing you to get a systematic effect of the created object of architectural creativity as a result of reaching a new quality level with unique classification characteristics. The examples of architectural objects presented in the article are differentiated by the degree of the emergence effect.

*Keywords: emergence, artistic perforation, deconstructivism, composition, postmodernism*









Деконструктивизм как стилевое направление представляет собой апогей эпохи постмодернизма. По оценкам специалистов, его можно отнести к одному из самых агрессивных направлений, поставивших под сомнение необходимость отсылки к традициям, региональной семантике, композиционной завершенности, функциональной логике и конструктивной тектонике. Основываясь на парадигме конструктивизма и постмодернизма, деконструктивизм можно охарактеризовать как деструкцию базовых принципов проектирования архитектурных объектов с искажением и, зачастую, полным игнорированием системы координат, композиционных и конструктивных кодов этих стилей [1]. Главенствующие в деконструктивизме принципы атектоничности и антигравитационности стали определяющими в параметрической архитектуре, переход к которой был неоднозначен: в рамках доминирующей идеи деконструктивизма очень ярко выделились произведения великих мастеров архитектуры, уделяющих большое внимание композиционным вопросам и абстрактной символике. Эти факторы сформировали в комплексе выразительные образы, художественно-семантические акценты архитектурных объектов. В разной степени это проявилось в творчестве великих архитекторов современности, среди которых: Фрэнк Гери; Дэниэль Либерскинд, Питер Эйзенман, Рем Колхаас, Бен ван Беркель, Сантьяго Калатрава, Норман Фостер, Заха Хадид и другие. Построенные на современных технологиях, ряд их работ пронизаны символическими метафорами (табл. 1).

Двадцатый век в архитектуре деконструктивизма и параметризма завершился активным переходом к компьютерному моделированию архитектурных объектов, предлагая новые формы воплощения функционально-планировочных и композиционных структур, построенных с помощью компьютерных технологий на базе сконструированного инфопространства [2]. На второй план были отодвинуты вопросы формирования аутентичности архитектурных объектов, транслирующих знаки и символы регионализма и историзма места. Здания утрачивают привычные архитектурные коды, а их форма становится следствием трансформации, развернутой во времени. Этот процесс архитектурные критики назвали детерриторизацией, когда происходит смещение прежних границ, размывание понятия места, фиксирование проницаемости и прозрачности пространства [3]. Формируется новая парадигма в архитектуре, предпосылками которой можно считать научные знания в области математики и физики с максимально используемыми новейшими технологиями в области цифровой, виртуальной, киберпространственной архитектуры.

---

\* The reported study was funded by RFBR, project number 20-312-90005

Выразительные образы, художественно-семантические акценты архитектурных объектов великих архитекторов-деконструктивистов

Архитектурные объекты в стиле деконструктивизма	
экстерьер	интерьер
1	2
	
<p>Центр здоровья мозга Лу Руво, Фрэнк Гери, США, Лас-Вегас, 2010 г.</p>	
	
<p>Исследовательский центр KAPSARC, Zaha Hadid Architects, Эр-Рияд, Саудовская Аравия, 2017 г.</p>	
	
<p>Здание Штаб-квартиры центрального китайского телевидения (CCTV), архитектор Рем Колхас, Пекин, Китай, 2012 г.</p>	
	
<p>Центр наук, инноваций и технологий, Сантьяго Калатрава, Лейклэнд, 2010–2014 г.</p>	



Архитектура общественных зданий приобрела креативный, глобализированный характер, аттрактивный – для городской среды мегаполисов мира вне учета их региональной специфики. Для архитекторов сложились условия, при которых технические возможности компьютерных технологий определили облик и композиционную структуру будущего объекта вне формирования образной метафоры и семантики, а современные архитекторы были поставлены в ситуацию поиска инструментария по возвращению «...эмоционального и общекультурного уровня выразительности в архитектуре» [2].

В ситуации доминирования киберпространства на основе информационных технологий как креативного средства проектирования общественных зданий возникла острая необходимость поиска новых метафор в архитектуре и средств их материализации.

Параметризм, фрактальность, дигитальность стали определяющей терминологией новейшей архитектуры, а дисфункциональность, положенная в основу архитектурного проектирования, вступила в активное противоречие с конечной целью создания аттрактивных и аутентичных городских доминант, концентрирующих социокультурную жизнь мегаполисов и отражающих их региональную специфику. По сути дела, такая ситуация получила определение как «Кризис в отношениях архитектуры с культурным контекстом» [4].

Анализ показал, что на смену эволюционному развитию архитектуры и методологии архитектурного проектирования общественных зданий идет коэволюционный этап, актуализированный взаимообусловленностью социокультурной, техногенной и художественной компонентами, объединенными в единую целостную систему – архитектурный объект [5, 6, 7]. В этом контексте на повестке дня стоит вопрос о механизме воплощения концептуализированного языка архитектуры общественного здания, как важнейшего коммуникатора городской среды, в которой символы и знаки являются медиаторами, определяющими диалог материально-пространственной среды города и его жителей вне зависимости от временных, региональных, социальных и языковых различий. Формирование образа города является существенной составляющей идентификации городской среды и брендинга территории, привлечения инвестиционных и людских потоков, интеграции населения и воспитания чувства принадлежности к малой родине [8, 9, 10]. Архитектура общественного здания в информационном пространстве города является сегодня важнейшим элементом социокультурного поля, а его композиционные коды – топологическими индикаторами.

Активное использование художественной перфорации в качестве таких индикаторов не только обеспечивает расширение палитры формообразования архитектурных объектов, но и позволяет закрепить в сознании горожан образы объектов и окружающей их городской среды, сформировав локальную идентичность городских пространств. Так, сами объекты и архетипы среды получают собственные названия и топонимы, закрепляется в названии мест, районов и частей города, дополняя «культурный ландшафт» [11, 12].

По оценкам специалистов, становление научного знания о функционировании сложных систем, в том числе о фрактальной геометрии, нелинейной динамике, эмерджентности систем, привело к новому пониманию процесса проектирования ключевых архитектурных объектов. Рассмотрение существа формирования такого сложного архитектурного объекта как общественное здание корреспондирует с вопросами, связанными с возникновением нового качества (функционально-планировочного и композиционно-пространственного) при комбинаторике проектируемых объемов в рамках сложившихся современных деконструктивистских направлений. Взаимное функционирование архитектурных объемов в контексте коэволюции (сложного взаимодействия и сочетания, механизма взаимообусловленных изменений элементов, составляющих развивающуюся целостную систему) предполагает не простое сложение свойств каждого из них, а получение системного эффекта, позволяющего рассматривать созданный объект как результат выхода на новый качественный уровень, когда система получает уникальные классификационные характеристики и у нее появляются свойства, не присущие ее компонентам по отдельности. Этот эффект получил название «эмерджентность» [13, 14, 15].

Эффект эмерджентности особенно актуален в период господства деконструкции в архитектуре, когда форма разбита на отдельные части, имитирует расщепление, распад, демонстрирует нестабильность, динамику, антигравитацию, часто не связана с историей и контекстом, в формах архитектуры отсутствует симметрия, согласованность.

Авторский анализ мирового опыта проектирования и реновации общественных зданий с включением приема художественной перфорации показал широкую палитру ее возможностей по созданию образной составляющей архитектуры. Именно художественная перфорация способна образовывать связи, которые «...укрепляются и разрастаются, используя компоненты как узловые точки согласованной сети ради создания целостной структуры» [2].








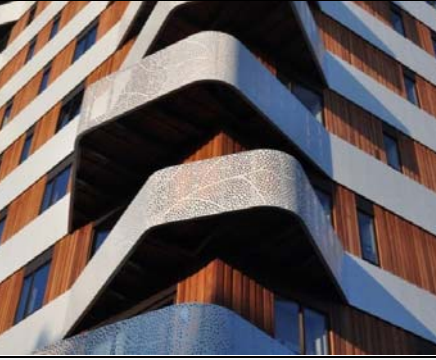
Мировая практика архитектуры демонстрирует примеры включения перфорации в качестве нового инструментария формообразования, который обеспечивает получение системного эффекта в контексте эмерджентности системы. В итоге возникают свойства новой формы как результат усиливающегося эффекта композиционных приемов, придания зданиям уникального характера.

Массив примеров был дифференцирован на три укрупненные группы по степени проявления эффекта эмерджентности в архитектуре общественного здания: макроэффект, мезоэффект и микроэффект (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Дифференциация эффекта эмерджентности при включении художественной перфорации в архитектуру общественного здания

Степень эффекта эмерджентности в архитектуре общественного здания	
макроэффект	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Павильон бабочек, дизайн-студия 3deluxe. Остров Нур, ОАЭ, 2015г.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Универмаг Liverpool Insurgentes, Архитектор: Михель Рохкинд, реконструкция Михель Рохкинд, Мексика, Мехико, 2010-2014 г.</p> </div> </div>

		
	<p>Общественный спортивный центр The House of Chutes-Lavie, г. Марсель, Франция, 2012 год</p>	<p>Павильон Италии — Palazzo Italia (Дворец Италии) на Ехро-2015, архитектурная компания Nemesi &amp; partners, главный архитектор проекта Мишель Моле, Милан, Италия, 2015 г.</p>
<p>мезоэффект</p>		
	<p>Штаб-квартира компании Statoil, бюро A-lab, Осло, Норвегия, 2012 г.</p>	<p>Оперный театр, архитекторы Henning Larsen Architects, Юйхань, Китай, 2019 г.</p>
		
	<p>Проект «Cube» и «Tube», студия «Sako Architects», Jinhua, Китай, 2010 г.</p>	<p>Культурный комплекс «King Kumho Culture Complex», строительная мастерская «Unsangdong Architects», Сеул, Южная Корея, 2008 г.</p>
<p>микрорэффект</p>		
	<p>Коммерческая недвижимость, Jacques Ferrier Architecture, Франция, 2015 г.</p>	<p>Коммерческая недвижимость, бюро 24H architecture, Nijmegen, Нидерланды, 2011 г.</p>



	
<p>Автостоянка для больницы в Генте, разработана Abscis Architecten, Генте, Бельгия</p>	<p>Отель «Созвездие Ле Вильгиалес», JUVIGNAC Франция, 2018 г.</p>

Макроэффект – художественная перфорация включается в дублирующий фасад зданий, который выступает новым объемом, «перекраивающим» его композиционную и формообразующую структуру. Такой прием нашел широкое применение в современной и новейшей архитектуре и получил воплощение в следующих объектах: Павильон бабочек (дизайн-студия 3deluxe, остров Нур, ОАЭ, 2015 г.), универмаг Liverpool Insurgentes (архитектор Михель Рохкинд, реконструкция Михель Рохкинд, Мексика, Мехико, 2010-2014 г.), общественный спортивный центр The House of Chutes-Lavie (г. Марсель, Франция, 2012 год), Павильон Италии Palazzo Italia (Евро-2015, архитектурная компания Nemesi & partners, главный архитектор проекта Мишель Моле, Милан, Италия, 2015 г.) и другие [16–19].

Мезоэффект – художественная перфорация выполняет роль композиционного символического знака и локализуется в границах фасадных плоскостей архитектурного объекта. Яркими примерами являются: штаб-квартира компании Statoil (бюро A-lab, Осло, Норвегия, 2012 г.), оперный театр в Китае (архитектуры Henning Larsen Architects, Юйхань, Китай, 2019 г.), проект «Cube» и «Tube» (студия «Sako Architects», Jinhua, Китай, 2010 г.), культурный комплекс «Kring Kumho Culture Complex» (строительная мастерская «Unsangdong Architects», Сеул, Южная Корея, 2008 г.) и другие [20].

Микроэффект – художественная перфорация находит отражение в архитектурных деталях: ограждения лоджий, козырьки, крыши, оконные жалюзи и прочее. Эффект проявляется в следующих архитектурных объектах: автостоянка для больницы в Генте (разработан Abscis Architecten, Генте, Бельгия), коммерческая недвижимость (бюро 24H architecture, Nijmegen, Нидерланды, 2011 г.), отель «Созвездие Ле Вильгиалес» (JUVIGNAC Франция, 2018 г.), коммерческая недвижимость (Jacques Ferrier Architecture, Франция, 2015 г.) [21].

Таким образом, авторы делают вывод, что художественная перфорация является новым инструментом формообразования, обеспечивающим получение системного эффекта в контексте эмерджентности системы, когда свойства новой формы, полученные в результате ее включения, возникают как результат интеграции целого ряда композиционных приемов, придавая общественным зданиям уникальный образ и символический смысл. Прием использования художественной перфорации в архитектуре общественного здания сегодня можно рассматривать как эстетически образную реновацию и поиск нового формообразования.

#### Список литературы

1. Стиль деконструктивизм в архитектуре: описание, фото. – URL: <https://rehouz.info/stil-dekonstruktivizm-v-arxitekture-opisanie-foto/>

2. Никос, А. Салингарос Чарльз Дженкс и новая парадигма в архитектуре. Глава из книги «Анти-архитектура и деконструкция: триумф нигилизма» / А. Никос; пер. с англ. А. Ложкина, С. Ситара // Международный журнал исследований культуры. – «Эйдос», 2016.
3. Вавилонская, Т.В. История пространственных искусств. Архитектура XX-XXI вв. / Т.В. Вавилонская. – Самара, 2016. – 359 с.
4. Добрицына, И.А. От постмодернизма – к нелинейной архитектуре: архитектура в контексте современной философии и науки / И.А. Добрицына. – М.: Прогресс-Традиция, 2004. – 416 с.
5. Коэволюция в архитектуре. – URL: [http://www.lxjkh.com/info\\_detail/?ru\\_3-126926443215&В\\_архитектуре\\_коэволюции](http://www.lxjkh.com/info_detail/?ru_3-126926443215&В_архитектуре_коэволюции)
6. Коэволюция. – URL: <http://ponjatija.ru/taxonomy/term/4461>
7. Новейший философский словарь. – URL: <https://gufo.me/dict/philosophy/КОЭВОЛЮЦИЯ>
8. Котлер, Ф. Маркетинг городов. Привлечение инвестиций, предприятий, жителей и туристов в города, коммуны, регионы и страны Европы /Ф. Котлер, К. Асплунд., И. Рейн, Д. Хайдер. – СПб.: Стокгольмская школа экономики в Санкт-Петербурге, 2005. – 194 с.
9. Хорева, Л.В. Территориальный брендинг: инновационный инструмент повышения конкурентоспособности услуг туристской дестинации / Л.В. Хорева, Д.А. Королева // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2019. – №6 (120). – С. 74–82.
10. Родькин, П.Е. Брендинг территории: к проблеме репрезентации и бренд-идентификации / П.Е. Родькин // Современные проблемы сервиса и туризма. – 2018. – № 4, т. 12. – С. 25–33.
11. Крашенинников, А.В. Пространственный каркас городской среды / А.В. Крашенинников // Материалы международной научно-практической конференции. – М.: Московский архитектурный институт (государственная академия), 2018. – С. 143–146.
12. Калинина, Г.Н. Понятие и методология исследования культурного ландшафта / Г.Н. Калинина, С.В. Тикунова // Вестник МГУКИ. – 2018. – №5 (85). – С. 10–17.
13. Сысоев, А.Н. Эмерджентность как критерий качества феномена / А.Н. Сысоев // Культура: теория и практика. – М.: Московский государственный институт культуры, 2016.
14. Альбеков, Н.Н. Эмерджентность как объект современной науки / Н.Н. Альбеков // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №2. – С. 421.
15. Муратов, А.С. Синергизм и эмерджентность: генезис их гармонизации в экономике и управлении / А.С. Муратов, И.П. Поварич // Вестник КемГУ. – 2012. – № 1 (49). – С.271–275.
16. Павильон бабочек. – URL: <https://www.admagazine.ru/architecture/pavilion-babochek-v-oae>
17. Универмаг Liverpool Insurgentes – реконструкция. – URL: <https://archi.ru/projects/world/8804/univermag-liverpool-insurgentes-rekonstrukciya>
18. Общественный спортивный центр The House of Chutes-Lavie. – URL: <https://www.archdaily.com/421492/the-house-of-chutes-lavie-damien-fluchaire-and-julien-cogne>
19. Павильон Италии Palazzo Italia. – URL: <https://pictoday.ru/p/9724/>
20. Штаб-квартира компании Statoil в Осло. – URL: <https://archi.ru/projects/world/8086/shtab-kvartira-kompanii-statoil-v-oslo>
21. Декоративные фасады. – URL: <http://france-resille.com/facades/>

## References

1. Style deconstructivism in architecture: description, photo. – URL: <https://rehouz.info/stil-dekonstruktivizm-v-arxitekture-opisanie-foto/>

2. Nikos, A. Salingeros Charles Jenks and the new paradigm in architecture. Chapter from the book «Anti-architecture and deconstruction: the triumph of nihilism» / A. Nikos; trans. from English by A. Lozhkin, S. Sitar) / International journal of culture research. – Eidos, 2016.
3. Vavilonskaya T.V. History of spatial arts. Architecture of the XX-XXI centuries / T.V. Vavilonskaya. – Samara: State arch.-builds. UN-t., 2016. – 359 p.
4. Dobritsyna, I.A. From postmodernism to non-linear architecture: Architecture in the context of modern philosophy and science / I.A. Dobritsyna. – M.: Progress-Tradition, 2004. – 416 p.
5. Coevolution in architecture. – URL: [http://www.lxjkh.com/info\\_detail/?ru\\_3-126926443215&Arhitektuurigalerii](http://www.lxjkh.com/info_detail/?ru_3-126926443215&Arhitektuurigalerii)
6. Term coevolution. – URL: <http://ponjatija.ru/taxonomy/term/4461>
7. Term coevolution newest philosophical dictionary. – URL: <https://gufo.me/dict/philosophy/КОЭВОЛЮЦИЯ>
8. Kotler, F. Marketing of cities. Attracting investment, businesses, residents, and tourists to cities, communes, regions, and countries in Europe / Kotler, K. Asplund., I. Rein, D. Haider. – Saint Petersburg: Stockholm school of Economics in Saint Petersburg. 2005. – 194 p.
9. Khoreva, L.V. Territorial branding: an innovative tool for improving the competitiveness of tourist destination services / L.V. Khoreva, D.A. Koroleva // Izvestiya of Saint Petersburg state University of Economics. – 2019. – No. 6 (120). – P. 74–82.
10. Rodkin, P.E. Branding of the territory: to the problem of representation and brand identification / P.E. Rodkin // Modern problems of service and tourism. – 2018. – No. 4, Vol. 12. – P. 25–33.
11. Krashennnikov, A.V. Spatial framework of the urban environment / A.V. Krashe-ninnikov // Materials of the international scientific and practical conference. – M.: Publishing house: Moscow architectural Institute (State Academy), 2018. – P. 143–146.
12. Kalinina, G.N. Concept and methodology of cultural landscape research / G.N. Kalinina, S.V. Tikunova // Bulletin of the Moscow State University of Culture. – 2018. – No. 5 (85). – P. 10–17.
13. Sysoev, A.N. Emergence as a criterion for the quality of a phenomenon / A.N. Sysoev // Culture: theory and practice. – M.: Publishing House: Moscow State Institute of Culture (Khimki), 2016.
14. Albekov, N.N. Emergence as an object of modern science / N.N. Albekov // Modern problems of science and education: Publisher. – 2015. – No. 2. – P. 421.
15. Muratov, A.S. Synergy and emergence: the Genesis of harmonisation in Economics and management / A.S. Muratov, I.P. Povarich // Vestnik Kemgu. – 2012. – No. 1 (49). – P. 271–275.
16. Pavilion of butterflies. – URL: <https://www.admagazine.ru/architecture/pavilion-babochek-v-oae>
17. Department Store Liverpool Insurgentes-reconstruction. – URL: <https://archi.ru/projects/world/8804/univermag-liverpool-insurgentes-rekonstrukciya>
18. Public sports center The House of Chutes-Lavie. – URL: <https://www.archdaily.com/421492/the-house-of-chutes-lavie-damien-fluchaire-and-julien-cogne>
19. Italian Pavilion Palazzo Italia. – URL: <https://pictoday.ru/p/9724/>
20. Statoil Headquarters in Oslo. – URL: <https://archi.ru/projects/world/8086/shtab-kvartira-kompanii-statoil-v-oslo>
21. Decorative facades. – URL: <http://france-resille.com/facades/>

УДК 725.1:35 (1-21)

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

**Дерина Мария Александровна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Петрянина Любовь Николаевна,**  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Derina Maria Aleksandrovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Urban Construction and  
Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Petryanina Lyubov Nikolaevna,**  
Associate Professor of the department «Urban  
construction and Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

## КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГОРОДСКИХ ОБЩЕСТВЕННЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина

Приведены результаты анализа архитектурно-планировочных составляющих городских общественных многофункциональных центров в соответствии с нормативным регламентом по степени их значимости, составу общественных объектов, параметрам с целью решения проблемы их целостного развития. Показаны закономерности создания многофункциональных городских центров. Выполнено сравнение предполагаемого размещения объектов в многофункциональных центрах с действительным распределением. Решена задача по разработке модели для создания единой архитектурно-планировочной структуры городских многофункциональных центров в процессе проектирования и строительства объектов общественного назначения. Установлено совпадение архитектурно-планировочного расположения объектов в целом на территории города и в многофункциональных общественных центрах. Предложено формирование состава объектов многофункциональных городских центров с использованием вероятностной модели.

*Ключевые слова: проект, прогноз, жилой район, многофункциональный центр, общественный объект, модель архитектурно-планировочной структуры*

## CONCEPT OF FORMATION OF ARCHITECTURAL AND PLANNING PATTERNS OF URBAN PUBLIC MULTIFUNCTIONAL CENTERS

M.A. Derina, L.N. Petryanina

The analysis of the architectural and planning components of urban public multifunctional centers in accordance with the regulatory regulations on the degree of their significance, the composition of public facilities, parameters in order to solve the problem of their integral development are presented. The regularities of creating multifunctional urban centers are shown. The proposed placement of objects in multifunctional centers is compared with the actual distribution. The problem of developing a model for creating a unified architectural and planning structure of urban multifunctional centers in the process of designing and building public facilities has been solved. The coincidence of the architectural and planning location of objects in general on the territory of the city and in

multifunctional public centers is established. The formation of the composition of objects of multifunctional urban centers using a probabilistic model is proposed.

*Keywords: urban project, forecast, residential area, multifunctional center, public object, model architectural and planning structure*

Архитектурно-планировочное проектирование и строительство современных городских многофункциональных центров выполняются в соответствии с их назначением и размещением жилых и общественных территорий города. В зависимости от места расположения многофункциональных центров и потребностей населения изменяется их состав. Общественные центры жилых микрорайонов формируются из объектов, пользующихся повседневным спросом, центры районного и городского значения – из объектов для эпизодического использования. Состав учреждений общественного назначения, формирующих центры, обусловлен степенью их значимости в городской структуре. Регламент состава районных и микрорайонных центров установлен нормативными документами.

Центры современных районов и микрорайонов функционально и пространственно значительно развиты, взаимосвязаны – наполнены различными объектами общественного назначения. Но проведенный анализ архитектурно-планировочных составляющих городских общественных многофункциональных центров по степени их значимости, составу общественных объектов, параметрам показал, что требования нормативных регламентов расходятся с действительностью. Это указывает не столько на недостаточное финансирование, сколько в большей степени на отсутствие оценки складывающихся условий образования и развития таких объектов. Правильно сформированных районных и микрорайонных центров с единой структурой значительно меньше, чем установлено нормами. Их заменяют относительно стихийные структуры из самостоятельных независимых сооружений общественного назначения.

Для решения проблемы целостного развития городских многофункциональных центров ставилась задача разработки модели, позволяющей совершенствовать создание единой архитектурно-планировочной структуры городских многофункциональных центров в процессе проектирования и строительства объектов общественного назначения, а также координации этого процесса.

Ниже показаны результаты выполненных исследований по определению архитектурно-планировочных закономерностей создания многофункциональных городских центров и формированию модели с использованием этих закономерностей в процессе проектирования и строительства всего комплекса обслуживания.

Описание создания городских центров на основе нормативных данных дано с учетом того, что сроки возведения и расположение объектов общественного назначения определяются многими факторами, имеющими примерно равное значение. Поэтому принцип причинности при описании объекта, включенного в состав центра, использовать невозможно. Это стало основой для определения процесса формирования городских центров как случайного. В пределах такого подхода было принято, что взаимное сочетание объектов общественного назначения определяется их соотношением в городской системе культурно-бытового обслуживания.

Многофункциональный городской центр рассматривался как набор учреждений общественного назначения, централизованно расположенных в системе города (особенности, характеризующие взаимосвязь объектов в центрах, не рассматривались). С учетом принятых ограничений городские центры определяются с помощью статистических показателей по территориальному расположению объектов общественного назначения и показывают степень влияния факторов, постоянно действующих на исследуемой территории. Таким образом были определены места с максимальным сосредоточением объектов общественного назначения – более 90 %.

Анализ состава многофункциональных городских общественных центров выполнялся в соответствии с регламентом, изложенным в нормативных документах. По принятым условиям были определены частота повторяемости различных объектов общественного назначения. Эти данные систематизировались по назначению объектов

по мере увеличения их количества, и рассчитывалась общая сумма. Полученные данные по количеству и значимости объектов по исследуемым районам города показали примерно одинаковый результат, который не зависел от размеров территории и её расположения. Такой результат объясняется одинаковой ситуацией при архитектурно-планировочном формировании общественных центров в городских районах.

Аналогично анализировался состав объектов общественного назначения в местах их сосредоточения, определялось количество типов объектов, находящихся там. Затем рассчитывалось их распределение по повторяемости и значимости.

В результате исследований было выявлено частое совпадение архитектурно-планировочного расположения объектов в целом на территории города и в многофункциональных общественных центрах (рис. 1).

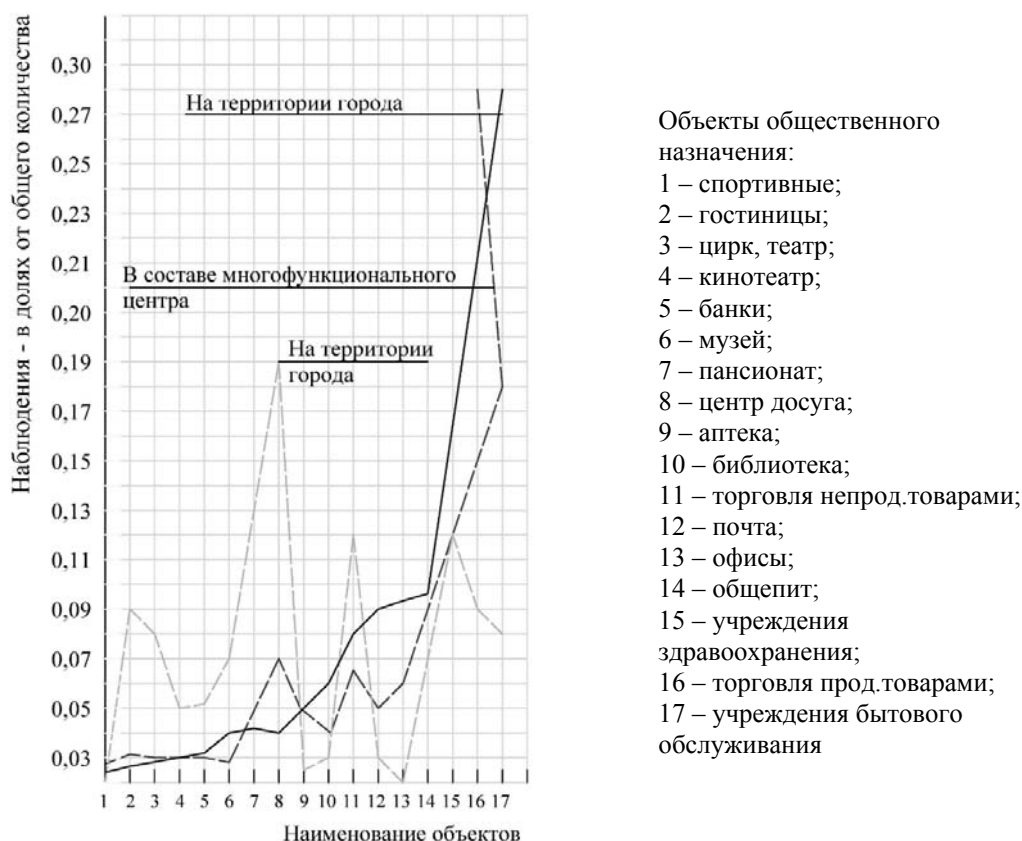


Рис. 1. Сравнение нормативного размещения городских объектов общественного назначения по числу объектов

Чтобы проверить достоверность совпадения результатов по количеству объектов, которые могли быть получены при принятых условиях, было выполнено сравнение по показателю объема. Расположение объектов в этом случае имеет существенные различия (рис. 2). Это указывает на то, что расхождения между нормативным и действительным расположением объектов также очевидно. Расхождения показывают закономерности более частого расположения некоторых объектов в многофункциональных центрах в сравнении с городом в целом.

Сравнение предполагаемого размещения объектов в многофункциональных центрах с действительным распределением по центрам разного размера приведено на рис.3.

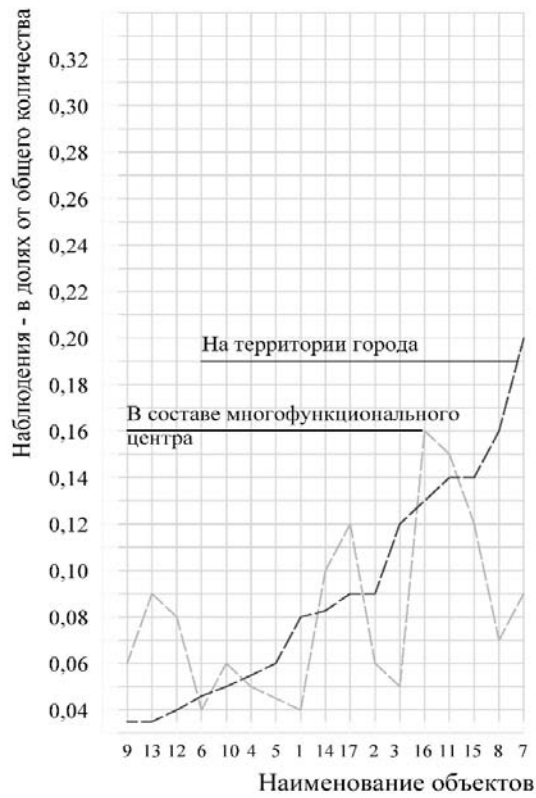


Рис. 2. Сравнение нормативного размещения городских объектов общественного назначения по величине объектов

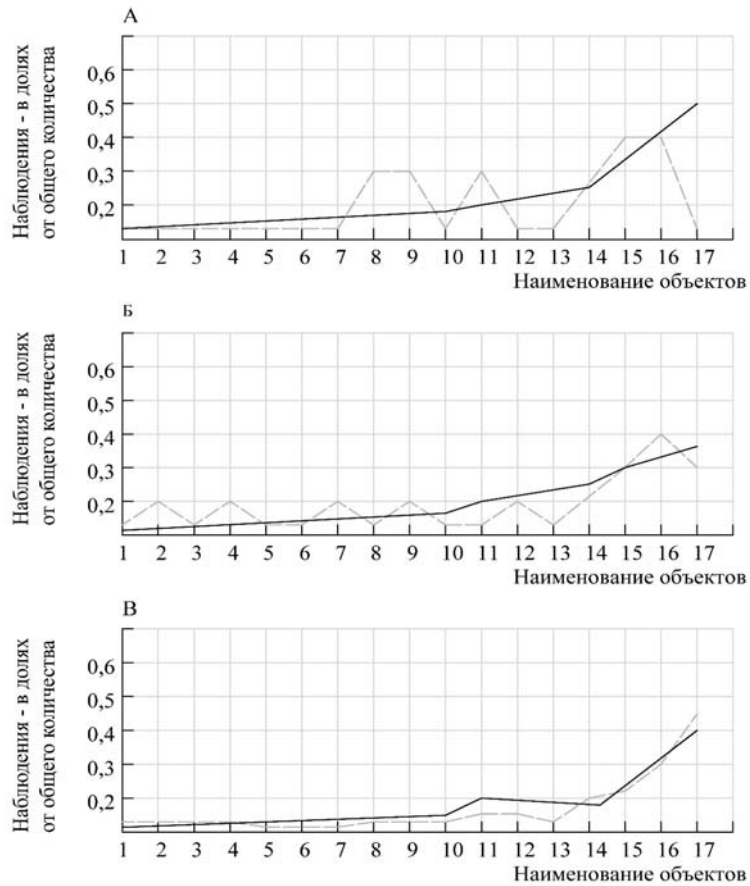


Рис. 3. Сравнение размещения комплекса учреждений бытового обслуживания на территории города и в составе функционального центра: А – 10 учреждений; Б – 20 учреждений; В – 42 учреждения

Выполненный анализ показал, что многофункциональные центры располагаются в виде групп на достаточно близком расстоянии в центре планировочных районов. Состав в естественно складывающихся центрах формируется взаимосвязанно и зависит от темпов строительства и совершенствования объектов общественного назначения. При создании центральной части района общественные объекты последовательно входят в состав центров в зависимости от наиболее вероятного их строительства и размещения в формирующемся комплексе. Таким образом, составляющие центров последовательно взаимодополняют его.

На основе полученных закономерностей была сформирована модель создания единой архитектурно-планировочной структуры городских многофункциональных центров, которая показывает процесс их поэтапного формирования при строительстве объектов общественного назначения. В состав модели входят следующие компоненты:

- состав объектов общественного назначения и наибольшая вероятность введения их в состав многофункционального центра, разделенные по зонам;
- исходная номенклатура общественных объектов, показывающая поэтапное увеличение их по видам при формировании центра.

Модель основана на следующих принципах:

- количество объектов, строящихся на определенном этапе, принято равным наименьшему числу объектов, входящих в комплекс, – 10;
- расчетные показатели по каждому виду объектов умножаются на количество объектов на определенном этапе;
- объекты распределяются по многофункциональным центрам поэтапно;
- многофункциональный городской центр формируется до того, как общее количество его объектов дойдет до значения, определенного эмпирически для категории центра (города или района);
- следующий многофункциональный центр начинает формироваться при необходимости строительства первого наиболее крупного объекта, который уже есть в предыдущем центре; далее к нему добавляют новые объекты в случае завершения предыдущего центра; если этого не произошло, то новые объекты делятся между предшествующими центрами;
- состав каждого центра функционально формируется так, чтобы он повторял исходный набор; уникальные объекты приняты по данным отдельных исследований.

Модель формирования городских многофункциональных центров была применена при проектировании объектов общественного назначения для новых микрорайонов (см. таблицу). Сравнение данных по набору объектов в центрах, полученных по расчетной модели и в результате натурных обследований, дало следующие результаты: больше всего совпадений по центробразующим уникальным объектам (спортивным, центрам досуга, театрам и т.п.); несколько большие различия (15-18 %) отмечены по первоочередным объектам центров; наибольшие различия (60-80 %) – по массовым объектам (здравоохранения, аптеки, почты, банки).

Используя предлагаемую модель при проектировании жилых районов и микрорайонов, можно предусмотреть набор объектов в многофункциональных общественных центрах. При известной отведенной территории под размещение центра можно определить другие показатели – количество, соотношение объектов по видам и значимости. Выполнять прогноз развития уже сложившегося центра, применяя модель, следует начиная с общего количества построенных на территории центра объектов. Далее на модели выполнять размещение объектов по назначению между центрами, сопоставляя с существующей структурой. Так определяются наиболее стабильно развивающиеся центры и объекты, размещаемые в них.

Прогноз при архитектурно-строительном проектировании повысит целесообразность принимаемых решений. Но так как проекты разрабатываются с учетом целого ряда архитектурно-планировочных, экономических, функциональных и других задач, то их результат не может полностью совпадать с прогнозируемыми данными. При этом, сравнивая наборы объектов многофункциональных центров, определенные проектом и составленные по прогнозу, можно получить наиболее точный проектный





3. Учитывать складывающиеся в течение продолжительного времени городские тенденции по формированию состава объектов в многофункциональных центрах.

От учета данных по прогнозу состава многофункциональных центров в современном архитектурно-планировочном проектировании зависит совершенствование городской структуры общественных центров в целом и составляющих их объектов, возможность использования определенных тенденций в архитектуре и строительстве новых и существующих зданий и сооружений общественного назначения.

#### Список литературы

1. Николаев, А.А. К вопросу проектирования общественных многофункциональных комплексов / А.А.Николаев, Ф.Д. Мубаракшина // Инновации и инвестиции. – 2018. – №11. – С.219.
2. Алтарев, В.А. Понятие многофункционального общественного комплекса «MIXED-US / В.А. Алтарев // Региональные архитектурно-строительные школы. – 2018. – №3. – С.154.
3. Петрянина, Л.Н. Система экологического менеджмента в проектной организации / Л.Н. Петрянина, А.А. Булдыгина, О.В. Карпова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С.165.
4. Петрянина, Л.Н. Реконструкция городской среды: новая и сложившаяся застройка / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, П.В. Монастырёв // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №4(29). – С.83–86.
5. Петрянина, Л.Н. Учёт природно-климатических условий в архитектурном проектировании / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина // Вестник ПГУАС: строительство, наука, образование. – 2016. – №2(3). – С.41–48.

#### References

1. Nikolaev, A.A. On the design of public and multifunctional systems / A.A. Nikolaev, D.F. Mubarakshina // Innovations and investments. – 2018. – №11. – P. 219.
2. Altarev, V.A. The Concept of a multifunctional public complex «MIXED-US / V.A. Altares // Regional architectural school. – 2018. – No. 3. – P. 154.
3. Petryanina, L.N. The environmental management system in the project organization / L.N. Petryanina, A.A. Buldygina, O.V. Karpova // Regional architecture and engineering. – 2017. – №4. – P. 165.
4. Petryanina, L.N. Reconstruction of the urban environment: new and existing buildings / L.N. Petryanina, M.A. Derina, P.V. Monastyrëv // Regional architecture and engineering. – 2016. – №4(29). – P. 83–86.
5. Petryanina, L.N. Consideration of the climatic conditions in architectural design / L.N. Petryanina, M.A. Derina // Bulletin of PGUAS: Construction, science, education – 2016. – №2(3). – P. 41–48.

УДК 72.03

*Нижегородский архитектурно-строительный университет*

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская д.65/5, 5 корпус

**Богомолова Ирина Сергеевна**,  
соискатель кафедры «Дизайн архитектурной среды»  
E-mail: Ira-mis@yandex.ru**Дуцев Михаил Викторович**,  
доктор архитектуры, профессор, ведущий научный сотрудник отдела проблем теории архитектуры НИИ теории и истории архитектуры и градостроительства, советник РААСН, академик Национальной академии дизайна, зав. кафедрой «Дизайн архитектурной среды»  
E-mail: nn2222@bk.ru*Nizhny Novgorod University of Architecture and Civil Engineering*

Russia, 603950, Nizhny Novgorod, 65/5 Ilinskaya str., 5 building

**Bogomolova Irina Sergeevna**,  
Candidate of the department «Design of Architectural Environment»  
E-mail: Ira-mis@yandex.ru**Duzev Mikhail Viktorovich**,  
Doctor of Architecture, Professor, Leading Researcher of the department of Problems of Theory and History of Architecture and Urban Planning, Advisor to the RAASN, Academician of the National Academy of Sciences, Head of the Department «Design of the Architectural Environment»  
E-mail: nn2222@bk.ru

## ПОНЯТИЕ ДИЗАЙН-МЫШЛЕНИЯ И ЕГО РОЛЬ В АРХИТЕКТУРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

И.С. Богомолова, М.В. Дуцев

Дано понятие дизайн-мышления и рассмотрены его особенности в архитектурном проектировании. Исследование направлено на переосмысление стратегического мышления и процесса проектирования в архитектуре путем анализа различных методов и стратегий процесса проектирования.

*Ключевые слова: взаимодействие, дизайн, дизайн-мышление, архитектура, проектирование, процесс, методология дизайна, проектная деятельность*

## CONCEPT OF DESIGN THINKING AND ITS ROLE IN ARCHITECTURAL DESIGN

I.S. Bogomolova, M.V. Duzev

The concept of design thinking is given and its features in architectural design are considered. This research aims at rethinking of the strategic thinking and design process in architecture by analyzing different methods and strategies of the design process.

*Keywords: interaction, design, design thinking, architecture, design, process, design methodology, project activity*

Само понятие «дизайн» рассматривается в качестве стратегии решения проблем, в которой используют искусство и науку для выработки решений проблемных ситуаций с помощью творческих способностей. Дизайнеры и архитекторы, как профессионалы, решают проблемы различными способами, однако они вырабатывают шаблоны или последовательность шагов, которые ранее считались эффективными для достижения своих целей: от замысла до завершения общего архитектурного процесса.

На сегодняшний день существует множество определений дизайна. Если рассматривать дизайн в широком смысле, то, на наш взгляд, философской и емкой является формулировка Б. Арчера: «Дизайн – это перевод мысли в действие».

В узком смысле под дизайном понимается «проектно-художественная деятельность по разработке промышленных изделий с высокими потребительскими и эстетическими качествами, деятельность по организации комфортной для человека предметной среды – жилой, производственной, социально-культурной» [1].

Сущность и различные функции дизайна отражены в следующей дефиниции: «Дизайн – органичное новое соединение существующих материальных объектов и жизненных ситуаций на основе метода компоновки при необходимом использовании данных науки с целью придания результатам этого соединения эстетических качеств и оптимизации их взаимодействия с человеком и обществом» [2].

**Материалы и методы.** Методы, использованные в исследовании: структурный и сравнительный анализ. Для большего углубления в тему были разобраны материалы различных зарубежных конференций, сопутствующих данной теме.

Многие исследования были написаны по методологии проектирования в архитектуре и градостроительстве; эти исследования критически анализируют, оценивают, сравнивают и предлагают альтернативные методы для творческого решения проблем, чтобы помочь дизайнерам и архитекторам понять их собственный стиль и предложить новые альтернативы для достижения решений. Кроме того, мотивация для исследования вытекает из наблюдения, что каждый архитектор использует свои собственные концептуальные основы, которые могут помочь в установлении границ и определении разумных целей.

Процесс проектирования – это вопрос, который часто рассматривается в последние десятилетия и провоцирует различные точки зрения. Многие исследователи пытались описать процесс, который архитектор преследует для достижения архитектурного производства [3]. Таким образом, главный вопрос заключался в следующем: каковы путь и процесс, которые дизайнер использует для достижения окончательного варианта своего проекта?

#### Характер процесса проектирования

Характер прояснения процесса проектирования является неотъемлемой частью любой работы, которая помогает не только улучшать, но и развивать его. Кроме того, он может предложить оптимальный и более эффективный процесс, основанный на анализе основного хода работы. С другой стороны, создавать систематическую структуру для непосредственного процесса проектирования, а также для обучения и использования его в архитектуре будет более эффективным и выгодным для других специалистов этой сферы, а также для тех, кто только учится или просто является ценителем.

Следовательно, была предпринята попытка описать всестороннее восприятие природы процесса проектирования. Исходя из этого, характер процесса проектирования может быть предложен как ход, который устраняет дилеммы и проблемы архитектурного проектирования с его помощью. Таким образом, может быть выработан устойчивый и успешный процесс для архитектурного проекта, нацеленного на эффективный результат, который будет адаптирован ко всем определенным контекстам и обстоятельствам проблемы. Метод исследования является аналитически-интерпретативным и основан именно на качественном анализе.

Проектирование – это попытка создать какие-либо решения до их полной реализации. Процесс проектирования пытается использовать оптимальные решения на различных уровнях для создания концепций путем сбора и классификации соответствующих ответов с точки зрения обеспечения целей проектирования [4]. Следовательно, не существует лучшего ответа на вопрос о проблеме архитектурного проектирования, и каждая проблема любого проекта может иметь различные решения.

Как правило, дизайн требует сложного умственного процесса и умения собирать широкий спектр информации, объединять их в согласованный набор идей и, наконец, создавать объективную форму этих концепций. В широком смысле, архитектурный дизайн – это вид деятельности, который опирается на широкий спектр знаний и факторов, таких, как изобразительное искусство, строительная инженерия и архитектура, экономическое и коммерческое управление, а также логические исследования. Профессиональные дизайнеры во всех областях используют принципы дизайна, чтобы найти ответ на возникающий в ходе работы вопрос. Дизайнеры изучают набор шаблонов, которые используются многократно, как стиль или способ для разработки методов решения проблем. Поскольку процесс архитектурного проектирования

является многоплановым и сложным, включающим в себя как знания, так и творческий потенциал, а также из-за обширных и разнообразных проблем и концепций, общих для предмета архитектуры и дизайна, достаточно сложно и даже порой невозможно определить и выявить четкий и всеобъемлющий метод проектирования [5].

Большинство дизайнеров и архитекторов считают, что проектная деятельность – это серия действий, которые являются эндогенными и неразличимыми. С точки зрения архитекторов, процесс проектирования настолько разнообразен из-за того, что каждый дизайнер начинает проектирование на основе своего конкретного метода или стиля, разработанного ранее [6]. Фактически дизайнер сначала создает так называемую проблему дизайна для ее полного понимания, используя умственные способности, затем предлагает начальную схему, основанную непосредственно на творчестве. Важнейшие этапы процесса проектирования формируются в сознании дизайнера неосознанно; генерация концепции является наиболее важной из них.

**Результаты.** Дизайн-мышление – это итеративный процесс (англ. iteration – «повторение»), в котором профессионал стремится понять пользователя, бросить вызов предположениям и переопределить проблемы в попытке определить альтернативные стратегии и решения, которые могут быть не сразу очевидны с нашим начальным уровнем понимания. В то же время дизайн-мышление обеспечивает подход к решению проблем, основанный на вопросах архитектурного проектирования. Это способ мышления и работы, а также набор практических методов, всецело используемых в архитектуре и дизайне.

Исследования о процессах проектирования, которые начались еще в конце 1950-х годов, были нацелены на извлечение действий, связанных с принятием решений при проектировании, для того чтобы найти эффективный и надлежащий путь к конкретному процессу от эскизирования до финального шага решения дизайнеров и проектировщиков. Следовательно, проектные мероприятия будут коммуникативными, сопоставимыми, обратимыми и повторяемыми. Так, дизайн – это аналитический процесс, который требует анализа, оценки и выбора. Исследователи основ проектирования в первые годы считали, что природа процесса проектирования в значительной степени независима от особенностей его вопроса, так что дизайн во всех областях имеет интегральный процесс [7]. С этой точки зрения дизайн – это процесс, который включает в себя разделение проблемы дизайна на отдельные элементы с целью использования исследовательской информации. После анализа информации отдельные элементы объединяются, чтобы создать единое целое.

В рамках дисциплин, связанных с дизайн-исследованием, и дисциплин, которые тем или иным образом имеют отношение к дизайну и проектированию в целом, всегда осуществлялось большое количество попыток осмысления дизайна как вида деятельности, процесса и результата. Первая волна публикаций в этой области приходится на начало 1960-х годов, хотя интерес к дизайну возник гораздо раньше. Подробному исследованию ранних теорий дизайна посвящен ряд научных трудов В. Л. Глазычева, раскрывающих суть западных теорий дизайна 1930-х гг. [3].

На первой конференции в Англии по методам проектирования в 1962 году исследователи и ученые определили этапы процесса проектирования, названные «анализ, синтез и оценка». Первая конференция включала доклады, освещающие различные аспекты изучения дизайна. На этой конференции не уделялось особого внимания разъяснению основных вопросов, например, что для разных ее участников означает понятие «дизайн», и казалось, что участники и организаторы способны проводить обсуждения на любом уровне, с любым содержанием, но при условии, что речь идет о проектировании или планировании какой-либо технологии. Позже Джон Кристофер Джонс, один из организаторов конференции, прокомментировал это утверждение: «на тот момент достаточно было знать, что дизайн – это то, что архитекторы, инженеры, промышленные дизайнеры и др. делают для того, чтобы производить чертежи, необходимые их клиентам и производителям». В предисловии к сборнику трудов этой конференции Питер Слан утверждает, что собранные тексты можно рассматривать как совокупность произведений начальной стадии дизайн-исследования,

служащие для проверки наличия и качества основы, на которой будет происходить дальнейшее развитие [8]. Очевидно, на тот момент этого было достаточно, хотя мало что указывает, что участниками конференции 1962 года были решены проблемы эпистемологии и семантики дизайна. Процесс архитектурного проектирования представляет собой сложную серию различных переменных на разных уровнях и в разных масштабах, которая взаимодействует и влияет друг на друга для достижения целей архитектурного проекта. Проектную деятельность можно рассматривать как новый способ объединения известных элементов или введения новых концепций. Методы проектирования оказали глубокое влияние на развитие академического интереса в области дизайна и проектирования, появились дизайн-исследовательские и конструкторские работы. В 1984 году Национальный научный фонд создал теорию дизайна и методологии программы для продвижения методов и исследований процессов в инженерном проектировании.

Кроме того, проектная деятельность выполняется в основном в группах. Когда два или более человека участвуют в процессе проектирования, они должны поговорить друг с другом об этом. Природа дизайнерского мышления является дискуссионной базой. Проблемы дизайна многоаспектны и, в основном, чрезвычайно интерактивны. Редко случается, что каждая часть проекта выполняет только одну цель [9].

Эдвард де Боно, признанный во всем мире эксперт в области креативности и обучения навыкам мышления, автор концепции латерального мышления и основанных на ней широко известных методик считает, что дизайн опирается на метод мышления, который он называет «дизайн-мышлением». Таким образом, различия паттерна проектирования в основном рассматриваются как последователи статуса проблемы проектирования. Большинство определений дизайна имеют общие черты. Во-первых, природа проектирования относится к процессу, во-вторых, этот процесс ориентирован на достижение таких целей, как проектирование, решение проблем, устранение потребностей, повышение эффективности создания нового полезного продукта. В этом исследовании процесс означает серию последовательных и явных действий, которые связывают цель и решение вместе.

**Выводы.** Процесс проектирования может быть, как сознательным, так и подсознательным усилием, которое специалисты данной сферы используют практически в каждом проекте. Процесс проектирования и методология играют ключевую роль в разработке инновационных дизайнерских решений для многих архитекторов и проектировщиков.

Другими словами, логическая и целенаправленная последовательность некоторых действий называется процессом. Метод проектирования также нуждается как в «последовательности решений», так и в «процессе проектирования» или «способе формирования дизайна» [10].

Кроме того, последовательности решений, включающие «анализ, синтез, оценку и принятие решения», должны выполняться на этапах процесса проектирования с высоким уровнем детализации. Поэтому большинство исследований, проводимых в области процессов проектирования, делают акцент на «когнитивном решении».

Таким образом, проблемы проектирования выявляются в основном через попытки их решения, так что кажется, что проблема и решение формируются вместе в процессе архитектурного проектирования. Взаимодействие проектной задачи и ее решения показывает, что анализ проблемы и выявление различных ее аспектов поддерживают способность ума и мысли проектировщика к достижению решения, а эффективность каждого из различных факторов будет разной в зависимости от способа решения задачи.

#### Список литературы

1. Воронов, Н.В. Суть дизайна / Н.В. Воронов. – М.: Грантъ, 2002. – 24 с.
2. Смирнова, А.Э. История и теория дизайна / А.Э. Смирнова. – URL: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red) (дата обращения: 28.06.2020)

3. Глазычев, В.Л. Дизайн как он есть / В.Л. Глазычев. – Изд. 2-е, доп. – М.: Европа, 2006. – С. 41–86.
4. Джонс, Дж.К. Методы проектирования / Дж.К. Джонс. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
5. Богомолова, И.С. Метод аналогий как способ поиска новых идей в архитектурном проектировании / И.С. Богомолова // Программа XIV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки XXI века». – М., 2016. – С. 5–11.
6. Лидтка, Ж. Думай как дизайнер. Дизайн-мышление для менеджеров / Ж. Лидтка, Т. Огилви; пер. с англ. Т. Мамедовой. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015. – 240 с.
7. Перси Хилл. Наука и искусство проектирования. Методы проектирования, научное обоснование решений / Перси Хилл. – М.: Мир, 1973. – 264 с.
8. Альмомани, Х.М. Алгоритмы дизайн-мышления: теория и практика / Х.М. Альмомани, Т.Ю. Быстрова. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39160758>. (дата обращения: 17.07.2020).
9. Браун, Т. Дизайн-мышление: от разработки новых продуктов до проектирования бизнес-моделей / Т. Браун; пер. с англ. Владимира Хозинского. – 2-е изд. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. — 256 с.
10. Дизайн-мышление. Рабочие материалы // Методическое руководство по применению человекоориентированного подхода к проектированию. – М., 2019. – 55 с. – URL: <https://lab-w.com/tools>
11. Европейская хартия об архитектурном наследии. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902012280>
12. Коновалова, Ю. Дизайн-мышление: как это работает / Ю. Коновалова. – URL: [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=1&v=yK1gDm289So](https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=yK1gDm289So)
13. Gregory, S.A. The human perspective, the design situation and its opportunities / S.A. Gregory. – London: Butterworths, 1966. – 389 p.
14. Рос, Б. Привычка достигать. Как применять дизайн-мышление для достижения целей, которые казались вам невозможными / Б. Рос. – ООО «Манн, Иванов и Фербер», 2017. – 225 с.
15. Байтенов, Э.М. Дизайн: прошлое, настоящее, горизонты / Э.М. Байтенов // Искусство Евразии. – 2019. – №3 (14). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dizayn-proshloe-nastoyashee-gorizonty> (дата обращения: 15.08.2020).
16. Eder, W.E. Definitions and Methodologies / W.E. Eder. – London: Butterworths, 1966. – 221 p.
17. Богомолова, И.С. Грань копирования в архитектурном проектировании / И.С. Богомолова // V Международная научная конференция «Исследования молодых ученых» – Казань, 2019.
18. Гринцевич, Л.В. Трансформация видов и принципов дизайна в современном мире / Л.В. Гринцевич // ЭСГИ. – 2017. – №4 (16). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-vidov-i-printsipov-dizayna-v-sovremennom-mire> (дата обращения: 20.09.2020).
19. Мосиенко, М.К. Дизайн-мышления как стиль и метод философии / М.К. Мосиенко // Философия и культура. – 2018. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dizayn-myshlenie-kak-stil-i-metod-filosofii> (дата обращения: 25.09.2020)
20. Ambrose Gavin. Design Thinking / Gavin Ambrose, Paul Harris. Published by AVA Publishing SA. – 2004. – 228 p.

## References

1. Voronov, N.V. The essence of design / N.V. Voronov. – М.: Grant, 2002. – 24 p.
2. Smirnova, A.E. History and theory of design / A.E. Smirnova. – URL: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red) (accessed: 28.06.2020)

3. Glazychev, V.L. Design as it is / V.L. Glazychev. – Ed. 2, add. – M.: Europe, 2006. – P. 41–86.
4. Jones, J.K. Design methods / J.K. Jones. – M.: Mir, 1986. – 326 p.
5. Bogomolova, I.S. The method of analogies as a way of searching for new ideas in architectural design / I.S. Bogomolova // Program of the XIV scientific and practical international conference "Actual problems of science of the XXI century". – M., 2016. – P. 5–11.
6. Lidtka, Zh. Think like a designer. Design-thinking for managers / Zh. Lidtka, T. Ogilvie; translated from English by T. Mamedova. – M.: Mann, Ivanov and Ferber, 2015. – 240 p.
7. Percy Hill. The science and art of design. Design methods, scientific justification of solutions / Percy Hill. – M.: Mir, 1973. – 264 p.
8. Almomani, H.M. Algorithms of design thinking: theory and practice / H.M. Almomani, T.Yu. Bystrova. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39160758>. (Accessed 17.07.2020).
9. Brown, T. Design-thinking: from the development of new products to the design of business models / T. Brown; trans. Vladimir Khozinsky. – 2nd ed. – M.: Mann, Ivanov and Ferber, 2013. – 256 p.
10. Design thinking. Working materials // Methodological guide for the application of a human-oriented approach to design. – M., 2019. – 55 p. – URL: <https://lab-w.com/tools>
11. European Charter on Architectural Heritage. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902012280>
12. Konovalova, Yu. Design-thinking: how it works / Yu. Konovalova. – URL: [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=1&v=yK1gDm289So](https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=yK1gDm289So)
13. Gregory, S.A. Human perspective, project situation and its possibilities / S.A. Gregory. – London: Butterworths, 1966. – 389 p.
14. Ros, B. Habit of achieving. How to apply design thinking to achieve goals that seemed impossible to you / B. Ros. – LLC "Mann, Ivanov and Ferber", 2017. – 225 p.
15. Baitenov, E.M. Design: past, present, horizons / E.M. Baitenov // Art of Eurasia. – 2019. – №3 (14). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dizayn-proshloe-nastoyaschee-gorizonty> (accessed: 15.08.2020).
16. Eder, W.E. Definitions and methodologies / W.E. Eder. – London: Butterworths, 1966. – 221 p.
17. Bogomolova, I.S. The facet of copying in architectural design / I.S. Bogomolova // X International Scientific Conference «Research of Young Scientists». – Kazan, 2019.
18. Grintsevich, L.V. Transformation of the types and principles of design in modern world / L.V. Grintsevich // ASGI. – 2017. – №4 (16). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-vidov-i-printsipov-dizayna-v-sovremennom-mire> (date accessed: 20.09.2020).
19. Moiseenko, M. K. Design thinking as a method of philosophy / M. K. Mosienko // Philosophy and culture. – 2018. – No. 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dizayn-myshlenie-kak-stil-i-metod-filosofii> (accessed 25.09.2020)
20. Ambrose Gavin. Design thinking / Gavin Ambrose, Paul Harris. Published by AVA Publishing SA. – 2004. – 228 p.