

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

**Выходит 4 раза в год**

**Учредитель и издатель**

Пензенский государственный  
университет архитектуры  
и строительства

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

Главная редакция:

А.М. Данилов (главный редактор)

Е.В. Королев (заместитель  
главного редактора)

И.А. Гарькина (ответственный  
секретарь)

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 12.12.2022.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 24,875. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 438.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ  
АРХИТЕКТУРА  
И СТРОИТЕЛЬСТВО  
4(53)/2022**

**Содержание**

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ИЗДЕЛИЯ..... 5**

**Логанина В.И., Карпова О.В.**  
**ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТДЕЛКИ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
И КОНСТРУКЦИЙ..... 5**

**Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В.**  
**ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ  
ЦЕМЕНТНОЙ ПОДЛОЖКИ НА  
НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ..... 12**

**Береговой В.А., Лавров И.Ю.**  
**ВЫСОКОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЕТОНЫ  
В СТАНКОСТРОЕНИИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ..... 18**

**Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.**  
**ОБЩАЯ СХЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ И  
СИНТЕЗА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ... 26**

**Селяев В.П., Селяев П.В., Лазарев А.Л.,  
Грязнов С.Ю., Аверкина М.Ю.**  
**ФРАКТАЛЬНАЯ КВАНТОВО-  
МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ  
БЕТОНА..... 31**

**Черкасов В.Д., Щербак Ю.П., Юркин Ю.В.,  
Авдонин В.В., Черкасов Д.В.**  
**САМОКЛЕЯЩИЕСЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ  
ПОКРЫТИЯ ..... 41**

**Королев Е.В., Гарькина И.А., Данилов А.М.**  
**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК  
СИСТЕМ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ..... 51**

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ  
И СООРУЖЕНИЯ ..... 59**

**Снежкина О.В., Шенин А.И., Стешин К.М.**  
**ПРОЧНОСТЬ НАКЛОННОГО СЕЧЕНИЯ  
ИЗГИБАЕМОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО  
ЭЛЕМЕНТА..... 59**

© Авторы публикаций, 2022

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2022

© ПГУАС, 2022

<b>Гарькин И.Н., Гарькина И.А., Клюев С.В., Саденко Д.С.</b> ИЗ ОПЫТА ЭКСПЕРТИЗЫ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА ..... 66	<b>Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А.</b> МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СКОРОСТНЫХ ПОЛЕЙ В ЗОНЕ ВСАСЫВАЮЩЕГО ОТВЕРСТИЯ ВЫТЯЖНОГО ЗОНТА ..... 132
<b>Мартышкин Д.О., Арискин М.В.</b> РАССТАНОВКА ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБ В СОЕДИНЕНИЯХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ..... 75	<b>Королева Т.И., Столяров Д.В., Шапошник Д.С.</b> АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИФфуЗИОННОГО ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ ..... 140
<b>Арискин М.В., Ванин И.В.</b> СОЕДИНЕНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАЛЬНЫХ ШАЙБАХ С ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБОЙ ..... 84	АРХИТЕКТУРА..... 150
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ .....90	<b>Гайдук А.Р., Сабитов Л.С., Мирхасанов Р.Ф., Бочарова Ю.В.</b> ОБРАЗНОЕ РЕШЕНИЕ АРХИТЕКТУРНО- ИНЖЕНЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ: БАШНЯ И СВЕТ ..... 150
<b>Чертес К.Л., Пыстин В.Н., Тупицына О.В., Гришин Б.М.</b> ОБРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ СМЕСИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД И ТВЁРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ..... 90	<b>Раузеев И.З., Сабитов Л.С., Бочарова Ю.В.</b> СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В АРХИТЕКТУРНОЙ РЕНОВАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ.. 161
<b>Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.</b> НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЕСТРУКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ..... 98	<b>Лапшина Е.Г.</b> КОНЦЕПЦИЯ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРОДОВ: ДИНАМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ..170
<b>Вилкова Н.Г., Мишина С.И.</b> УЛЬТРАЗВУК В ИЗМЕНЕНИИ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ОРГАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ ..... 105	<b>Шабанов Е.С., Титунин А.А.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПАЛУБОК ДЛЯ РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ..... 176
<b>Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К.</b> ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ПРИНЦИПАХ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС ..... 111	<b>Смирнова Ю.О., Грабовый К.П.</b> СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОЙ РЕНОВАЦИИ В СФЕРЕ СТРОИТЕЛЬСТВА: МЕХАНИЗМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ... 181
<b>Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСРЕДНЕННЫХ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ГИДРАВЛИЧЕСКИ ГЛАДКИХ И ВПОЛНЕ ШЕРОХОВАТЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДАХ..... 120	<b>Резник С.Д., Черниковская М.В.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФИНАНСОВОЙ ГРАМОТНОСТИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ В СТРОИТЕЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ....187
	Указатель статей, опубликованных в 2022 году ..... 195

# Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	<b>Ariskin M.V., Vanin I.V.</b> CONNECTION OF WOODEN STRUCTURES ON STEEL WASHERS WITH INTERNAL THREAD .....	84
<b>Loganin V.I., Karpova O.V.</b> APPLICATION OF STATISTICAL METHODS OF FINISHING QUALITY MANAGEMENT OF BUILDING PRODUCTS AND STRUCTURES .....	5	ENGINEERING SYSTEMS .....	90
<b>Loganina V.I., Svetalkina M.A., Ariskin M.V.</b> THE EFFECT OF THE SURFACE ROUGHNESS OF CEMENT SUBSTRATE ON THE STRESSED STATE OF PAINT COATINGS .....	12	<b>Chertes K.L., Pystin V.N., Tupitsyna O.V., Grishin B.M.</b> PROCESSING AND UTILIZATION OF A MIXTURE OF SEWAGE SLUDGE AND SOLID MUNICIPAL WASTE: PROMISING TECHNOLOGICAL SOLUTIONS .....	90
<b>Beregovoy V.A., Lavrov I.Y.</b> HIGHLY FUNCTIONAL CONCRETE IN MACHINE TOOL CONSTRUCTION: TECHNOLOGICAL ASPECTS OF APPLICATION .....	18	<b>Andreev S.Yu., Knyazev V.A., Lebedinsky K.V.</b> NEW TECHNOLOGY OF DESTRUCTIVE TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER .....	98
<b>Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b> GENERAL SCHEME OF IDENTIFICATION AND SYNTHESIS OF BUILDING MATERIALS .....	26	<b>Vilkova N.G., Mishina S.I.</b> INFLUENCE OF ULTRASOUND ON THE CHANGE IN THE WETTING ANGLE OF ORGANICALLY MODIFIED PARTICLES .....	105
<b>Selyaev V.P., Selyaev P.V., Lazarev A.L., Gryaznov S.Yu., Averkina M.Yu.</b> FRACTAL QUANTUM-MECHANICAL MODEL OF CONCRETE DEFORMATION AND DESTRUCTION .....	31	<b>Akifev I.V., Eremkin A.I., Ponomareva I.K.</b> INNOVATIVE METHOD FOR PERFORMING GEODETIC WORKS IN CONSTRUCTION ON THE PRINCIPLES OF THE GLONASS NAVIGATION SYSTEM .....	111
<b>Cherkasov V.D., Shcherbak Yu.P., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V., Cherkasov D.V.</b> SELF-ADHESIVE RADIO ABSORBING COATINGS .....	41	<b>Andreev S.Yu., Knyazev V.A., Lebedinskiy K.V.</b> AVERAGED LOCAL FLUID FLOW RATES IN HYDRAULICALLY SMOOTH AND QUITE ROUGH PROCESS PIPELINES .....	120
<b>Korolev E.V., Garkina I.A., Danilov A.M.</b> METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIALS AS SYSTEMS: STATUS AND OUTLOOK ..	51	<b>Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Orlova N.A.</b> METHODOLOGY AND EXPERIMENTAL STUDIES PROGRAM OF TEMPERATURE AND VELOCITY FIELDS IN THE ZONE OF THE SUCTION HOLE OF THE HOOD .....	132
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	59	<b>Koroleva T.I., Stolyarov D.V., Shaposhnik D.S.</b> ANALYTICAL EVALUATION OF MAIN THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF DIFFUSIVE LAMINAR FLAME .....	140
<b>Snezhkina O.V., Shein A.I., Steshin K.M.</b> STRENGTH OF AN INCLINED SECTION OF A BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENT .....	59	ARCHITECTURE .....	150
<b>Garkin I.N., Garkina I.A., Klyuev S.V., Sadenko D.S.</b> FROM THE EXPERIENCE OF EXAMINATION CONSTRUCTIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF THE FAR NORTH.....	66	<b>Gaiduk A.R., Sabitov L.S., Mirkhasanov R.F., Bocharova Y.V.</b> FIGURATIVE SOLUTION OF ARCHITECTURAL AND ENGINEERING COMPOSITION: TOWER AND LIGHT .....	150
<b>Martyshkin D.O., Ariskin M.V.</b> ARRANGEMENT OF GLUED FIBERGLASS WASHERS IN CONNECTIONS OF WOODEN STRUCTURES .....	75		

<p><b>Rauzeev I.Z., Sabitov L.S., Bocharova Y.V.</b>  MODERN TRENDS IN ARCHITECTURAL  RENOVATION OF INDUSTRIAL  ENTERPRISES AND INDUSTRIAL  COMPLEXES ..... 161</p> <p><b>Lapshina E.G.</b>  CONCEPT OF ARCHITECTURAL SPACE IN  CITIES: THE DINAMIC COMPONENT ..... 170</p> <p><b>Shabanov E.S., Titunin A.A.</b>  PROCESS IMPROVEMENT OF  FORMWORKS MANUFACTURING FOR  RESTORATIONS USING ADDITIVE  TECHNOLOGIES ..... 176</p>	<p><b>Smirnova Yu.O., Graboyyi K.P.</b>  SUSTAINABLE RENOVATION  STRATEGIES IN THE CONSTRUCTION  SECTOR: ENERGY SAVING  MECHANISMS ..... 181</p> <p><b>Reznik S.D., Chernikovskaya M.V.</b>  COMPARATIVE FEATURES OF THE  FORMATION OF STUDENTS FINANCIAL  LITERACY OF TECHNICAL AND  ECONOMIC DIRECTIONS OF TRAINING AT  A CIVIL ENGINEERING UNIVERSITY ..... 187</p> <p>Index of articles, published in 2022 ... 195</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_5

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

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

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

**Карпова Ольга Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

**Karpova Olga Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Quality Management and  
Construction Production Technology»

### ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТДЕЛКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

В.И. Логанина, О.В. Карпова

Приведены сведения о применении статистических методов при анализе качества поверхности лакокрасочных покрытий цементных бетонов. Рассмотрено влияние пористости цементной подложки, способа нанесения и реологических свойств краски на однородность распределения шероховатости по поверхности покрытий. Показано, что независимо от способа нанесения краски меньший разброс показателей шероховатости  $R_a$  характерен для поверхности всех покрытий на зашпатлеванной подложке.

*Ключевые слова: лакокрасочные покрытия, цементная подложка, качество покрытий, статистические методы*

### APPLICATION OF STATISTICAL METHODS OF FINISHING QUALITY MANAGEMENT OF BUILDING PRODUCTS AND STRUCTURES

V.I. Loganin, O.V. Karpova

Some information is given on the use of statistical methods in the analysis of surface quality of paint and varnish coatings of cement concrete. The influence of the cement substrate porosity, the method of application and rheological properties of the paint on the uniformity of roughness distribution over the surface of the coatings is considered. It is shown that, regardless of the method of applying the paint, a smaller spread of roughness indices  $R_a$  is typical for the surface of all coatings on a puttied substrate.

*Keywords: paint and varnish coatings, cement substrate, coating quality, statistical methods*

В ряду материалов, применяемых для отделки стен зданий, значительная доля принадлежит лакокрасочным материалам [1]. Климатические условия нашей страны предполагают высококачественную окраску финишных поверхностей и длительный срок их службы [2]. Однако анализ состояния окрашенных поверхностей стен зданий показывает, что зачастую разрушение покрытий наблюдается значительно раньше запланированного срока эксплуатации [3, 4]. В связи с этим разработка методологии обеспечения качества окрашенной поверхности и методов контроля является важной научно-технической и экономической проблемой. Решение этой проблемы в целом будет способствовать повышению срока службы защитно-декоративных покрытий.

Анализ научно-технической литературы показывает, что для обеспечения качества окрашенных поверхностей стен зданий следует внедрять статистические методы контроля, что позволит снизить процент брака, своевременно выявлять и устранять недостатки производства [5–7].

Приведем результаты эксперимента по применению статистических методов управления качеством при анализе качества отделки строительных изделий и конструкций.

Для создания защитно-декоративных покрытий применяли алкидную эмаль ПФ-115 (ТУ-2312-00058906885-2002), вододисперсионную акрилатную краску ВД-КЧ-21 (ТУ-2316-001-45145919-96), масляную краску МА-15 (ТУ-2317-025-050120542-2003)), а для выравнивания поверхности подложки – строительную масляно-клеевую шпатлевку (ТУ-5743-006-2056580-96). В качестве подложек применяли цементно-песчаный раствор.

Шероховатость покрытий измеряли с помощью портативного прибора для измерения шероховатости поверхности TIME TR100 и оценивали по показателю  $R_a$  [8].

Качество подложек оценивали по показателю общей пористости  $\Pi$  и по показателю поверхностной пористости  $\Pi_{п}$ . Поверхностную пористость определяли отношением площади пор к общей площади измеряемой поверхности. Диаметр пор оценивали с помощью измерительной лупы  $\times 24$ .

Зная истинную плотность образцов  $\rho_{и}$ , равную  $2900 \text{ кг/м}^3$ , находили пористость образцов:

$$\Pi = \frac{\rho_{и} - \rho_v}{\rho_{и}} \cdot 100\%.$$

Красочные составы наносились кистью на растворные подложки в два слоя с промежуточной сушкой в течение 24 ч.

Для анализа закономерностей распределения шероховатости по простиранию был проделан следующий эксперимент. Красочные составы наносились кистью, наливом, пневмоспособом на растворные подложки пористостью 24 %, 28 %, 32 % в два слоя с промежуточной сушкой в течение 20–40 минут. Всего было проведено по 50 измерений на каждой поверхности (рис. 1). Результаты исследований приведены в таблице и на рис. 2–4.



Рис. 1. Схема измерения шероховатости поверхности лакокрасочных покрытий на цементной подложке (все размеры даны в мм)

## Статистические показатели обработки данных выборок

Вид краски	Пористость подложки, %	Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ / размах данных $R$								
		Способ нанесения								
		Кисть			Налив			Пневматическое		
		Вязкость, Па·с $10^3$			Вязкость, Па·с $10^3$			Вязкость, Па·с $10^3$		
	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	
ПФ-115	24	4,11	2,71	1,5	1,95	1,63	1,48	2,88	2,8	3,02
		12,81	10,55	5,93	7,33	5,6	5,9	10,94	9,81	12,25
	28	0,86	0,64	1,69	1,63	1,93	1,52	1,92	2,38	2,83
		3,96	2,54	7,3	5,64	8,96	5,89	8,61	8,8	12,23
	32	1,74	2,14	1,8	1,97	2,5	2,22	3,32	2,24	2,5
		6,96	9,3	6,37	7,66	7,95	8,05	11,21	8,66	8,41
Ш.П.	0,43	0,71	0,97	0,53	0,71	0,31	0,95	0,71	0,83	
	1,8	2,86	4	2,25	3,4	1,64	3,68	2,96	3,74	
МА-15	24	1,65	2,51	1,56	1,6	1,8	1,7	2,94	1,85	2,73
		5,95	11,33	6,97	6,9	6,33	6,31	10,12	6,65	10,76
	28	1,23	1,99	1,56	1,86	1,95	1,91	2,6	2,48	2,91
		4,34	8,38	6,17	7,41	8	6,92	10,31	9,96	11
	32	2,12	1,61	1,44	1,27	1,43	1,79	5,61	2,45	2,65
		8,12	8,37	5,22	5,37	4,94	7,21	10,1	9,35	9,81
Ш.П.	0,78	0,93	0,87	1,19	1,02	1,4	1,21	0,89	0,96	
	2,96	4,42	4	3,68	3,62	4,68	4,52	3,35	4,06	
Вододисперсионная	24	2,15	1,62	2,18	2,52	1,86	2,66	-	-	-
		7,45	5,52	6,97	10,63	7,85	10,24	-	-	-
	28	1,81	2,01	1,31	2,17	1,75	2,2	-	-	-
		7,78	8,67	5,37	7,7	8,34	7,63	-	-	-
	32	2,11	0,96	1,3	2,63	1,06	2,55	-	-	-
		9,56	3,58	5,2	10,39	5,08	8,95	-	-	-
Ш.П.	1,02	0,96	0,95	1,05	2,52	1,52	-	-	-	
	4,46	3,46	3,7	4,1	8,92	6,81	-	-	-	

Примечание: Ш.П. – шпаклеванная подложка. Для краски ПФ-115  $\eta_1=0,001$  Па·с,  $\eta_2=0,00065$  Па·с,  $\eta_3=0,00026$  Па·с; для краски МА-115  $\eta_1=0,0026$  Па·с,  $\eta_2=0,002$  Па·с,  $\eta_3=0,0014$  Па·с; для краски вододисперсионной  $\eta_1=0,0347$  Па·с,  $\eta_2=0,02317$  Па·с,  $\eta_3=0,013$  Па·с

Анализ данных свидетельствует, что значение шероховатости поверхности покрытия зависит от способа нанесения красочного состава, его реологических свойств и пористости цементной подложки. Так, для масляной краски МА-15 (цвет зеленый) минимальное значение шероховатости, равное  $R_a=3,12$  мкм, достигается на подложке с пористостью П=24 % при вязкости краски  $0,00261 \cdot 10^3$  Па·с при нанесении ее кистью, а при пористости П=32 % – способом налива. Для краски ПФ-115 минимальное значение шероховатости, равное  $R_a=2,23$  мкм, достигается на подложке с пористостью П=28 % при вязкости краски  $0,00026 \cdot 10^3$  Па·с при нанесении ее кистью. Для вододисперсионной краски минимальное значение шероховатости, равное  $R_a=3,45$  мкм, достигается на подложке с пористостью П=32 % при вязкости краски  $0,013 \cdot 10^3$  Па·с при нанесении ее кистью, а максимальное значение шероховатости, равное

$R_a=6,5$  мкм, достигается на подложке с пористостью  $\Pi=24\%$  при вязкости краски  $0,0347 \cdot 10^3$  Па·с при нанесении ее кистью.

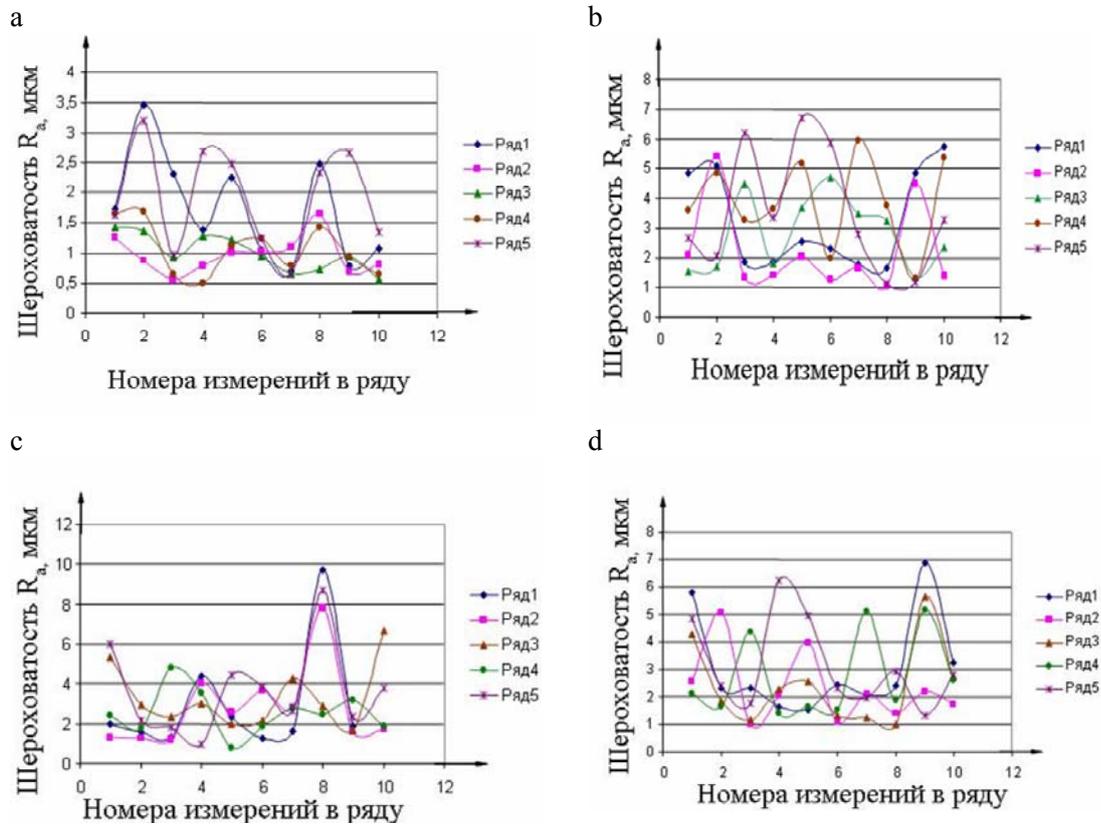


Рис. 2. Изменение шероховатости поверхности лакокрасочных покрытий на основе краски ПФ-115 по простиранию:

- а – вязкость краски  $0,00065$  Па·с, пневмонанесение краски на зашпаклеванную подложку;
- б – вязкость краски  $\eta_1=0,001$  Па·с, нанесение краски наливом на подложку пористостью  $28\%$ ;
- с – вязкость краски  $\eta_2=0,00065$  Па·с, нанесение краски наливом на подложку пористостью  $28\%$ ;
- д – вязкость краски  $\eta_3=0,00026$  Па·с, нанесение краски наливом на подложку пористостью  $28\%$ .

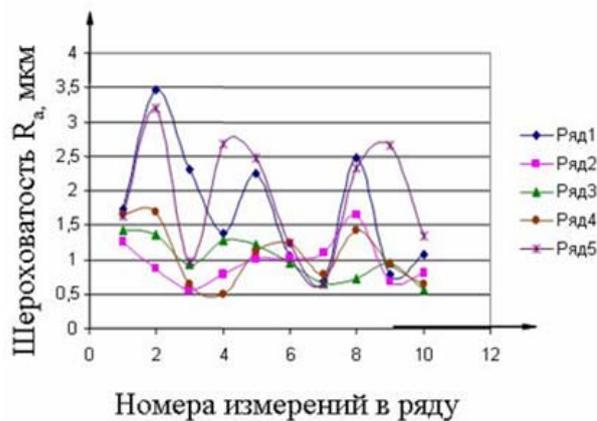


Рис. 3. Изменение шероховатости поверхности лакокрасочных покрытий по простиранию (краска МА-15 вязкостью  $0,0026$  Па·с, нанесение краски кистью на подложку пористостью  $24\%$ )

Для оценки однородности распределения показателей шероховатости по простиранию были рассчитаны статистические показатели (см. таблицу).

Установлено, что при нанесении краски ПФ-115 кистью на подложку с пористостью 24 % размах значений шероховатости  $R$  составляет от 5,93 мкм до 12,81 мкм, а краски МА-15 – от 5,95 мкм до 11,33 мкм. Размах между показателями шероховатости  $R_a$  поверхности покрытий на основе краски ПФ-115 на зашпаклеванной поверхности значительно ниже и составляет 2,96-4,42 мкм. Для краски ПФ-115 вязкостью  $0,001 \cdot 10^3$  Па·с более однородное по простиранию покрытие формируется при нанесении краски на подложку с пористостью 24 % наливом. Разброс показателей шероховатости  $R_a$  составляет 5,6 мкм. Независимо от способа нанесения меньший разброс показателей шероховатости  $R_a$  характерен для поверхности всех покрытий на зашпатлеванной подложке.

Результаты расчета значений среднеквадратического отклонения  $\sigma$  и математического ожидания  $\bar{x}$  показывают, что в зависимости от реологических свойств красочного состава, пористости подложки, способа нанесения формируется шероховатость поверхности покрытий различной однородности по простиранию. Для краски ПФ-115 вязкостью  $0,001 \cdot 10^3$  Па·с при пористости подложки 32 % более качественное покрытие формируется при нанесении краски кистью, однако более однородное по простиранию – пневмонанесением. При таком способе нанесения наблюдается меньший разброс показателей шероховатости.

На рис. 4 приведены гистограммы распределения показателей шероховатости поверхности покрытий на основе краски ПФ-115.

Анализ данных (см. рис. 4) свидетельствует, что распределение шероховатости может быть описано нормальным законом распределения. Соответствие эмпирического закона распределения гипотетическому проверяли по критерию Пирсона  $\chi^2$  при уровне значимости 0,05. При статистическом анализе были рассмотрены следующие моменты: какова широта распределения по отношению к широте поля допуска, каков центр распределения по отношению к центру поля допуска, какова форма распределения [9, 10].

Установлено, что центр распределения, равный  $\bar{x}=6,97$  мкм, и центр поля допуска, равный  $x=7,8$  мкм, практически совпадают, широта распределения составляет приблизительно 3/5 от поля допуска (рис.4,а). Следовательно, качество продукции (в данном случае качество внешнего вида покрытий) находится в удовлетворительном состоянии.

На рис. 4,б центр распределения смещен, среднее значение составляет  $\bar{x}=4,31$ , центр распределения не совпадает с центром поля допуска, составляющим  $x=7,8$  мкм, широта распределения составляет 1/2 от ширины поля допуска. Все это свидетельствует о вероятности получения дефектной поверхности.

На рис. 4,с центр распределения, равный  $\bar{x}=4,34$  мкм, смещен к нижнему пределу допуска, составляющему 0,4 мкм, центр распределения не совпадает с центром поля допуска. Левая сторона распределения на границе с нижним допуском имеет вид отвесного берега. Это свидетельствует о вероятности получения дефектной поверхности покрытий.

Таким образом, применение статистического анализа позволяет оценить дефектность окраски и разработать рекомендации по повышению качества лакокрасочных покрытий, что будет способствовать увеличению срока межремонтных работ.

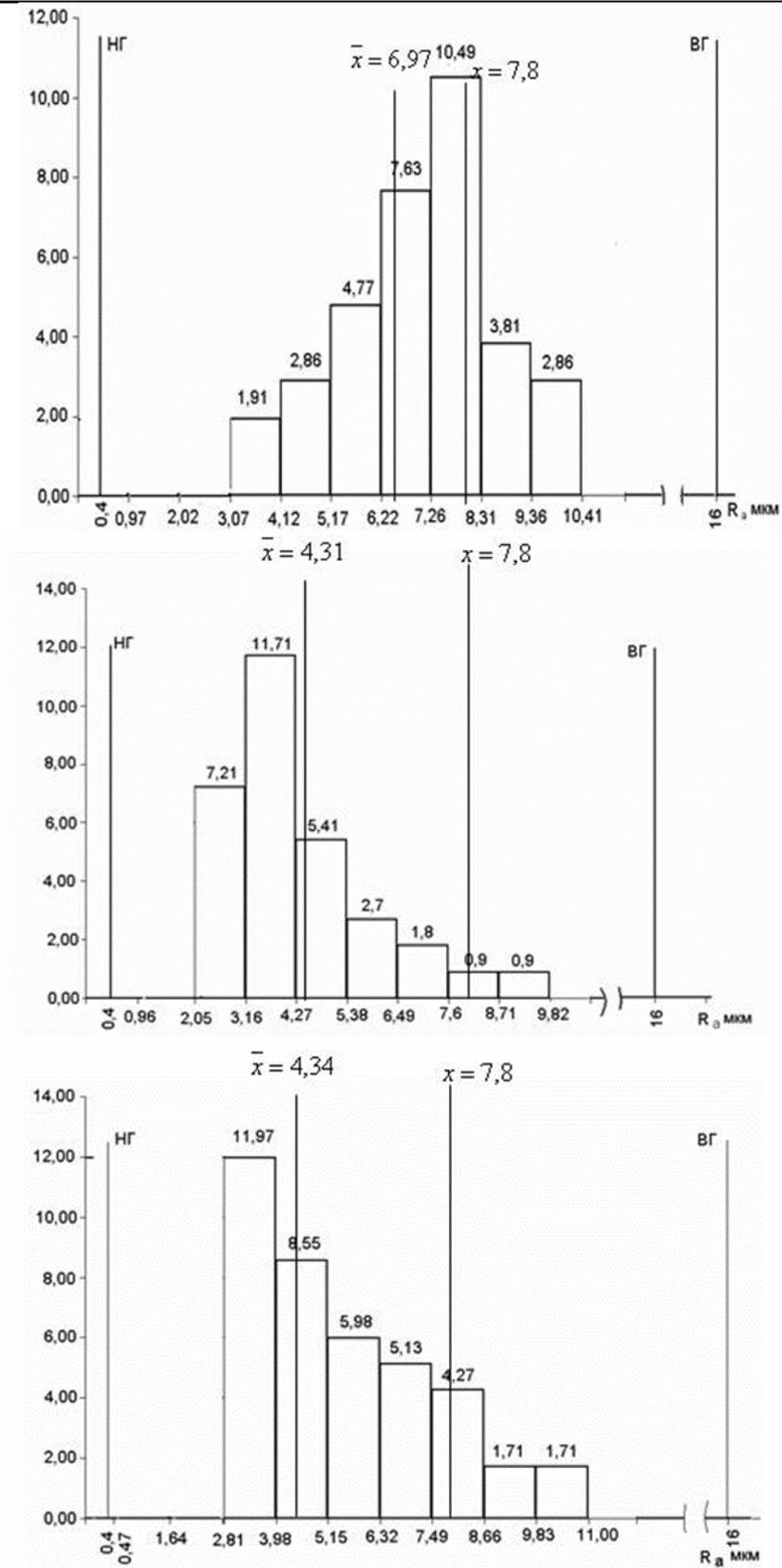


Рис. 4. Гистограммы частот распределения шероховатости поверхности покрытия на основе краски ПФ-115 на подложке пористостью 32 % (вязкость краски  $0,001 \cdot 10^3$  Па·с): а – нанесенной пневмоспособом; б – нанесенной наливом; с – нанесенной кистью

## Список литературы

1. Андруцкая, О.М. Перспективы развития лакокрасочной отрасли / О.М. Андруцкая // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2021. – №10. – С. 11–13.
2. Андолоро, А. Самоочищающиеся фасадные покрытия / А. Андолоро, Э.С. Маццучелли, А. Луккини, М.П. Педерфери // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2020. – № 3. – С. 18.
3. Логанина, В.И. Стойкость защитно-декоративных покрытий наружных стен зданий / В.И. Логанина, Л.П. Орентлихер. – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 104 с.
4. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христюлюбов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2004. – № 8. – С. 10–12.
5. Ноулер, Л. Статистические методы контроля качества продукции / Л.Ноулер, Дж.Хауэлл, Д.Толд, Э.Коулмэт, О.Моун, В.Ноулер. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 95 с.
6. Статистические методы повышения качества: пер. с англ./ под ред. Х.Кумэ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 304 с.
7. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.
8. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Стандартиформ, 1973.
9. 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.
10. Логанина, В.И. Управление качеством на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, О.В. Карпова, Л.В. Макарова. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 216 с.

## References

1. Andrutskaya, O.M. Prospects for the development of the paint and varnish industry / O.M. Andrutskaya // Paint materials and their application. – 2021. – No. 10. – P. 11–13.
2. Andoloro, A. Self-cleaning facade coatings / A. Andoloro, E.S. Mazzucchelli, A. Lucchini, M.P. Pedferri // Paints and varnishes and their application. – 2020. – No. 3. – P. 18.
3. Loganina, V.I. Durability of protective and decorative coatings on the exterior walls of buildings / V.I. Loganina, L.P. Orentlicher. – M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2001. – 104 p.
4. Loganina, V.I. Evaluation of the decorative properties of paint coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paint and varnish materials and their application. – 2004. – No. 8. – P. 10–12.
5. Knowler, L. Statistical methods of product quality control / L. Knowler, J. Howell, D. Told, E. Colemat, O. Mone, W. Knowler. – M.: Publishing house of standards, 1989. – 95 p.
6. Statistical methods for improving quality: trans.. from English / ed. H.Kume. – M.: Finance and statistics, 1990. – 304 p.
7. Loganina, V.I. Organization of statistical acceptance control of the quality of building products and structures / V.I. Loganina // Building materials. – 2008. – No. 8. – P. 98–99.
8. GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics. – M.: Standartinform, 1973.
9. Loganina, V.I. On the issue of regulation of technological processes of concrete production / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 3–4 (603–604). – P. 42–45.
10. Loganina, V.I. Quality management at construction industry enterprises / V.I. Loganina, O.V. Karpova, L.V. Makarova. – M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2008. – 216 p.

УДК 691-405

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_12

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

**Светалкина Мария Анатольевна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: adikaevka\_01@mail.ru

**Арискин Максим Васильевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

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

**Svetalkina Maria Anatolievna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Quality Management and  
Technology of Construction Production»  
E-mail: adikaevka\_01@mail.ru

**Ariskin Maksim Vasilievich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Building Structures»  
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕМЕНТНОЙ ПОДЛОЖКИ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Логанина, М.А. Светалкина, М.В. Арискин

Дана оценка напряженного состояния защитно-декоративных покрытий в зависимости от шероховатости цементной подложки при воздействии температурных напряжений. Для оценки напряженного состояния покрытий применялся программный модуль SCAD Office. Приведены результаты исследования влияния шероховатости поверхности подложки на напряженное состояние покрытий и определена вероятность их растрескивания. Установлено неравномерное распределение напряжений в зоне контакта покрытия с подложкой. Выявлено, что в холодный период года в покрытии возникают сжимающие напряжения. В зоне контакта с поверхностью подложки наблюдается концентрация сжимающих напряжений, а в местах изменения рельефа поверхности подложки возникают растягивающие напряжения. Оценена вероятность растрескивания покрытий.

*Ключевые слова: покрытия, напряжения, концентрация, шероховатость подложки, растрескивание*

## THE EFFECT OF THE SURFACE ROUGHNESS OF CEMENT SUBSTRATE ON THE STRESSED STATE OF PAINT COATINGS

V.I. Loganina, M.A. Svetalkina, M.V. Ariskin

The stress state of protective and decorative coatings from the action of thermal stresses is estimated depending on the roughness of the cement substrate. To assess the stress state of the coatings, the SCAD Office software module was used. The influence of the substrate surface roughness on the stress state of the coatings and the probability of their cracking was studied. An uneven distribution of stresses in the zone of contact between the coating and the substrate was established. In the cold season, compressive stresses arise in the coating. In the zone of contact with the substrate surface, a concentration of compressive stresses is observed, and tensile stresses also arise in places where the relief of the substrate surface changes. The probability of coating cracking is estimated.

*Keywords: coatings, stresses, concentration, substrate roughness, cracking*

Одними из распространенных видов материалов для отделки фасадов зданий являются лакокрасочные материалы и декоративные сухие строительные смеси [1–5]. Несмотря на прогнозируемый срок службы отделки 5–7 лет, разрушение декоративного отделочного слоя наступает значительно раньше вследствие его растрескивания и отслаивания.

В соответствии с теорией хрупкого разрушения растрескивание покрытий будет происходить, если внутренние растягивающие напряжения  $\sigma$  будут больше или равны когезионной прочности  $R$  [6, 7]:

$$\sigma \geq R_p. \quad (1)$$

При длительном действии нагрузки длительная когезионная прочность покрытий составляет

$$R_p^{дл.} = 0,5R_p^{кр}. \quad (2)$$

Условие растрескивания покрытия имеет вид

$$\sigma_{\max} > 0,5R. \quad (3)$$

Существует несколько методов оценки трещиностойкости отделочного слоя [8–12]. В практике исследовательских работ нашел применение метод оценки трещиностойкости по данным, полученным с помощью программного модуля SCAD Office [13]. В работе [14] описано влияние пор в зоне контакта «покрытие-подложка» на напряженное состояние покрытий. Выявлено, что при заполнении поры красочным составом максимальные напряжения в покрытии возникают в зоне контакта покрытия с подложкой, а при отсутствии заполнения поры краской максимальные напряжения возникают на поверхности покрытия. Авторами установлено влияние вида подложки на величину температурных напряжений.

В продолжение дальнейших исследований определяли влияние характера рельефа поверхности цементной подложки на напряженное состояние защитно-декоративных покрытий.

В качестве подложек использовали тяжелый бетон, характеризующийся значением модуля упругости,  $E=10,0 \cdot 10^3$  МПа. В качестве красочного состава применяли поливинилацетатцементную ПВАЦ краску. Значение КЛТР поливинилацетатцементного покрытия составляло –  $6,67 \cdot 10^{-6}$  1/град. Расчет был выполнен с помощью программного модуля SCAD Office. Расчетная модель представляет из себя конечные элементы оболочки размером  $0,1 \times 0,1$  мм. Материал подложки и лакокрасочного покрытия назначался путем присвоения элементу значений модуля упругости, коэффициента Пуассона, а также коэффициента линейного температурного расширения для соответствующего материала. Граничные условия прикладывались к противоположному от лакокрасочного слоя подложки, и перемещения ограничивали по всем 6 возможным направлениям. Для предотвращения влияния заделки на напряженно-деформированное состояние (НДС) в лакокрасочном слое и в области контакта с подложкой граничные условия располагались на расстоянии не менее чем 5 толщин лакокрасочного состава. Моделирование шероховатости в подложке выполнялось путем изменения вида сетки в местах контакта подложки и краски, а также использования треугольных конечных элементов типа 42 (треугольный конечный элемент оболочки). Применение данных элементов позволило смоделировать шероховатость с концентраторами напряжений в виде пик треугольных конечных элементов и, как следствие, в полной мере оценить изменение НДС в местах контакта подложки и красочного состава.

Шероховатость поверхности цементной подложки составляла 0,3 мм. Температурное воздействие задавалось как сжимающие или растягивающие усилия, действующие на лакокрасочное покрытие. Расчеты проводились для климатических условий г. Москвы. Схема сечений приведена на рис. 1.

Результаты расчета напряжений в покрытиях приведены на рис. 2 и в таблице. Эпюра распределения напряжений приведена на рис. 3.

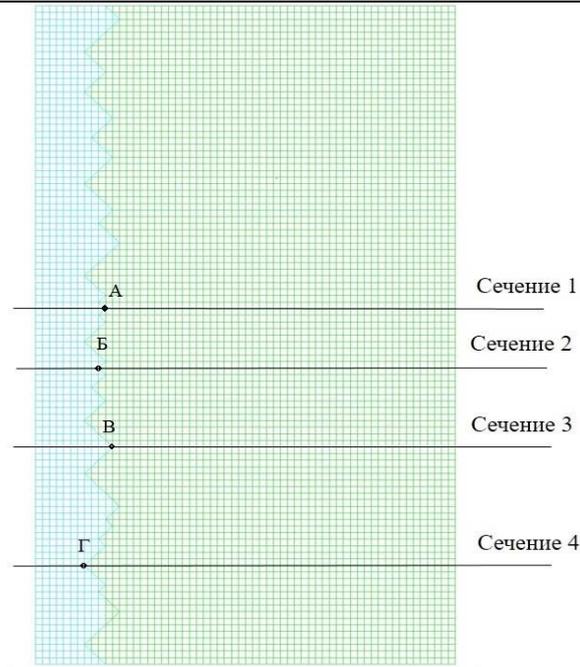


Рис. 1. Схема сечений

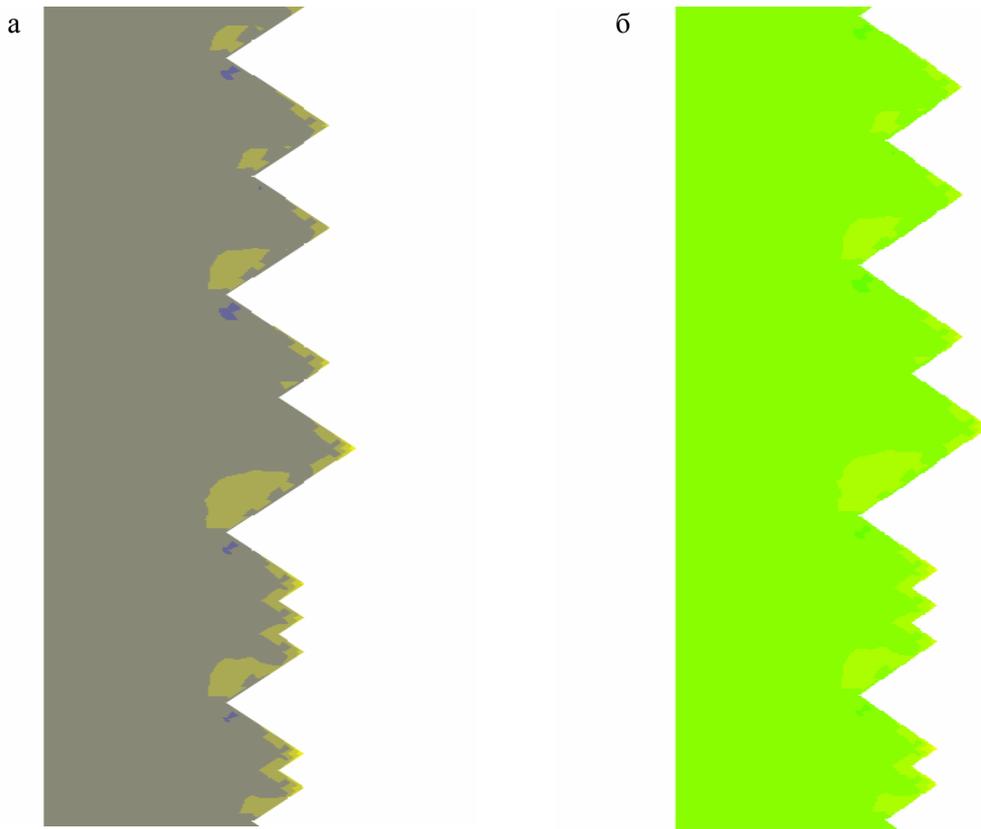
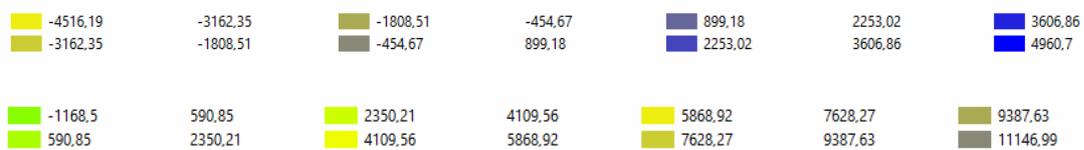


Рис. 2. Изополя распределение напряжений  $\sigma_x \cdot 10^{-3}$ , МПа, в поливинилацетатцементном покрытии:  
а – ноябрь; б – март



Значения напряжений  $\sigma_x$  в покрытии ПВАЦ в точке изменения рельефа поверхности цементной подложки

Напряжения $\sigma_x \cdot 10^{-3}$ МПа	Ноябрь	Март
сечение 1 (точка А)	-2873,14	3711,39
сечение 2 (точка Б)	-1618,77	1961,76
сечение 3 (точка В)	-5910,71	2608,34
сечение 4 (точка Г)	111,41	-80,54

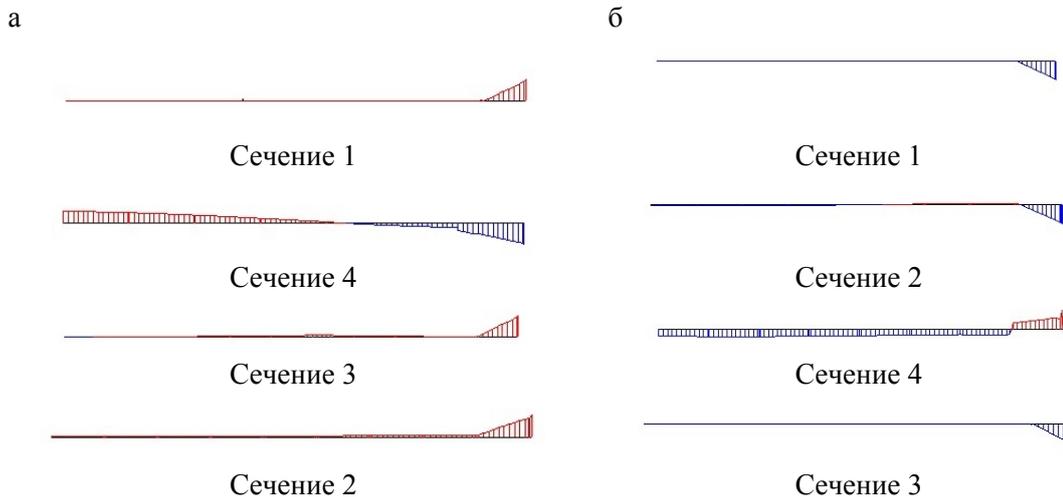


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений по сечению покрытий:  
а – в марте; б – в ноябре

Анализ данных свидетельствует, что в период с октября по февраль на покрытие действуют сжимающие напряжения (рис. 2,а). В ноябре в поверхностном слое покрытия возникают сжимающие напряжения, составляющие  $\sigma_x = -454,67 \cdot 10^{-3}$  МПа. В зоне контакта с поверхностью подложки наблюдается концентрация сжимающих напряжений, составляющая  $\sigma_x = -1808,51 \cdot 10^{-3}$  МПа, а в местах изменения рельефа поверхности подложки напряжения составляют  $\sigma_x = -3162,35 \cdot 10^{-3}$  МПа. Близко к зоне изменения рельефа поверхности наблюдается также появление растягивающих напряжений, составляющих  $\sigma_x = +899,18 \cdot 10^{-3}$  МПа.

При действии растягивающих напряжений (март-сентябрь) в покрытии возникают растягивающие напряжения. Так, в марте максимальные значения растягивающих напряжений составляют  $\sigma_x = (+4109,56-5868,92) \cdot 10^{-3}$  МПа (в зоне контакта с подложкой), а на поверхности покрытия  $\sigma_x = +590,85 \cdot 10^{-3}$  МПа. В сечении 4 (точка Г) значения напряжений составляют  $\sigma_x = -80,54 \cdot 10^{-3}$  МПа. В сечении 3 (точка В – максимальное падение рельефа поверхности подложки) значение напряжений составляют  $\sigma_x = +2608,34 \cdot 10^{-3}$  МПа (см. таблицу).

Длительная когезионная прочность ПВАЦ составляет 0,225 МПа. С учетом (3) следует, что велика вероятность растрескивания покрытий, т.к. растягивающие напряжения больше длительной когезионной прочности покрытий.

#### Список литературы

1. Карякина, М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий / М.И. Карякина. – М.: Химия, 1980. – 216 с.
2. Сухарева, Л.А. Долговечность полимерных покрытий / Л.А. Сухарева. – М.: Химия, 1984. – 240 с.
3. Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // Вестник Белгородского

государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 8–12.

4. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.

5. Логанина, В.И. Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 3 (627). – С. 20–23.

6. Бартенев, Г.М. Прочность и разрушение высокоэластических материалов / Г.М. Бартенев, Ю.С. Зуев. – М., Л.: Химия, 1964. – 388 с.

7. Логанина, В.И. Прогнозирование растрескивания полимерных покрытий бетонов / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1996. – № 9. – С. 14–16.

8. Дюрягина, А.Н. Применение графического редактора Adobe Photoshop для определения сплошности покрытий / А.Н. Дюрягина, А.В. Демьяненко, К.Н. Болатбаев // Промышленная окраска. – 2003. – № 4. – С. 30–33.

9. Горчаков, Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков, Л.П. Ортлихер, В.И. Савин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 144 с.

10. Логанина, В.И. Оценка трещинообразования покрытий с помощью метода акустической эмиссии / В.И. Логанина, Н.И. Макридин, Л.В. Макарова, В.Н. Карпов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 6 (534). – С. 35–38.

11. Эванс, А.Г. Конструкционная керамика: пер. с англ. / А.Г. Эванс, Т.Г. Лэнгдон. – М.: Металлургия, 1980. – 255 с.

12. Логанина, В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния лакокрасочного покрытия в зависимости от качества его внешнего вида / В.И. Логанина, И.В. Волков, В.В. Голубев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2008. – № 7 (595). – С. 26–30.

13. Логанина, В.И. Оценка напряженного состояния отделочного слоя на основе состава с применением синтезированных алюмосиликатов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, М.В. Арискин, З.Н. Родионова, М.А. Садовникова // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 2. – С. 77–79.

14. Арискин, М.В. Влияние пористости цементных бетонов на монолитность лакокрасочных покрытий / М.В. Арискин, В.И. Логанина, М.А. Светалкина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2. – С. 45–52.

## References

1. Karyakina, M.I. Physico-chemical foundations of the processes of formation and aging of coatings / M.I. Karyakina. – М.: Chemistry Publishing House, 1980. – 216 p.

2. Sukhareva, L.A. Durability of polymer coatings / L.A. Sukhareva. – М.: Chemistry Publishing House, 1984. – 240 p.

3. Loganina, V.I. Development of an organomineral additive for dry building mixtures / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2011. – No. 3. – P. 8–12.

4. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organo-mineral additives based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 9 (609). – P. 36–39.

5. Loganina, V.I. Influence of activation of diatomite on the properties of lime compositions / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // News of higher educational institutions. Construction. – 2011. – No. 3 (627). – P. 20–23.

6. Bartenev, G.M. Strength and fracture of highly elastic materials / G.M. Bartenev, Yu.S. Zuev. – М., Л.: Chemistry, 1964. – 388 p.

7. Loganina, V.I. Prediction of cracking of polymeric coatings of concrete / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Construction. – 1996. – № 9. – P. 14–16

8. Dyuryagina, A.N. Application of the graphic editor Adobe Photoshop to determine the continuity of coatings / A.N. Dyuryagina, A.V. Demyanenko, K.N. Bolatbaev // *Industrial coloring*. – 2003. – No. 4. – P.30–33.
9. Gorchakov, G.I. Composition, structure and properties of cement concretes / G.I. Gorchakov, L.P. Orentlicher, V.I. Savin. – M.: Stroyizdat, 1976. – 144 p.
10. Loganina, V.I. Estimation of cracking of coatings using the method of acoustic emission / V.I. Loganina, N.I. Makridin, L.V. Makarova, V.N. Karpov // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2003. – No. 6 (534). – P. 35–38.
11. Evans, A.G. Structural ceramics: trans. from English / A.G. Evans, T.G. Langdon. – M.: Metallurgy, 1980. – 255 p.
12. Loganina, V.I. Evaluation of the stress-strain state of the paintwork depending on the quality of its appearance / V.I. Loganina, I.V. Volkov, V.V. Golubev // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2008. – No. 7 (595). – P. 26–30.
13. Loganina, V.I. Evaluation of the stress state of the finishing layer based on the composition using synthesized aluminosilicates / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, M.V. Ariskin, Z.N. Rodionova, M.A. Sadovnikova // *Academic Bulletin UralNIIproekt RAASN*. – 2014. – No. 2. – P. 77–79.
14. Ariskin, M.V. Influence of porosity of cement concretes on the solidity of paint and varnish coatings / M.V. Ariskin, V.I. Loganina, M.A. Svetalkina // *Regional architecture and engineering*. – 2022. – No. 2. – P. 45–52.

УДК 691.2

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_18

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

**Береговой Виталий Александрович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»

**Лавров Иван Юрьевич,**  
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

**Beregovoy Vitaly Aleksandrovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Building materials  
and woodworking technology»

**Lavrov Ivan Yurievich,**  
Postgraduate

## ВЫСОКОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЕТОНЫ В СТАНКОСТРОЕНИИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

В.А. Береговой, И.Ю. Лавров

Рассмотрены технологические аспекты использования высокофункциональных бетонов в качестве конструкционных материалов станкостроения. Проанализированы основные преимущества и недостатки применения с этой целью традиционных материалов на основе черных металлов и новых цементных композитов. С учетом комплекса свойств показана целесообразность частичной замены металлических базовых деталей несущих систем станков на аналогичные, изготовленные из бетона. На примере изготовления обрабатывающего станка приведены результаты опытов по отливке отдельных элементов из бетона, а также результаты исследований по использованию биодобавок в цементных бетонах, способных к восстановлению частично разрушенной структуры.

*Ключевые слова: базовые детали станков, высокопрочный бетон, структурообразование, процессы биоцементации*

## HIGHLY FUNCTIONAL CONCRETE IN MACHINE TOOL CONSTRUCTION: TECHNOLOGICAL ASPECTS OF APPLICATION

V.A. Beregovoy, I.Y. Lavrov

The technological aspects of the practical implementation of the processes of restoration of architectural elements during the restoration of historical objects by means of biocementation and digital prototyping are considered. An algorithm has been developed for using differential thermal, chemical and petrographic analysis methods for rapid assessment of the component composition of solidified solutions used in the construction of cultural heritage sites.

*Keywords: basic machine parts, high-strength concrete, structure formation, cementation processes*

Несущий каркас станка является важнейшим функциональным компонентом всей системы обработки. Качество принятых в процессе проектирования конструктивных решений сказывается на обеспечении геометрической стабильности главных элементов станка при статических, динамических и тепловых нагрузках, а также на эффективности восприятия действующих сил и крутящих моментов. Прецизионность станков существенным образом зависит от способности их оснований демпфировать колебания и сохранять общую устойчивость в процессе обработки. В этой связи особую актуальность приобретают физико-механические свойства материалов (плотность,

модули упругости и сдвига, прочность на растяжение, сжатие и удар, показатель жесткости, демпфирующая и теплопроводящая способность, тепловое расширение и т.д.), использованных при изготовлении. В конечном счете цель проектирования – это структурная оптимизация станка, предусматривающая правильное размещение минимально возможного по условиям расчетов количества материала в требуемом месте и в нужной форме.

Известно, что практически все станки, построенные ранее 1830-х годов, были деревянными. Затем железо становится основным конструкционным материалом станкостроения. С тех пор и по настоящее время, обладая практически оптимальным среди промышленных материалов соотношением механических и технологических свойств, черные металлы составляют основу станкостроения. Гораздо реже в современных станках применяют природный камень, керамику и полимербетон [1, 2]. Современная тенденция – увеличение относительной доли использования полимерных композиционных материалов в машиностроении. Главным недостатком всех полимербетонов является повышенная стоимость.

Высокие показатели свойств цементных бетонов, созданных в последние десятилетия, позволяют рассматривать их в качестве альтернативы металлическим сплавам, традиционно применяемым в станкостроении для отливки наиболее массивных частей – базовых деталей несущих систем станков. Существенным преимуществом формовки бетонных базовых элементов является отсутствие высокотемпературных и энергоемких процессов (литье, сварка и т.п.). За рубежом существуют ультравысокопрочные бетоны, специализированные под применение в станкостроении (см. таблицу).

Показатели промышленных материалов, применяемых в станкостроении

Материал	Характеристика				
	$R_{сж}$ , МПа	$R_p$ , МПа	$E_{ст}$ , ГПа	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Стоимость, тыс.р/тонна
Чугун	550	170	115	7-7,8	30
Сталь	500	500	210	7,7-8,2	50,5
Алюминиевые сплавы	200	200	70	2,6-2,9	140
Гранит	230	10	49	2,34-2,78	10
Синтегран	120	27	27	2,4	150
NANODUR® Compound 5941	125-130	15	46,5	2,45	нд
Цементный бетон	120	10	50	2,4-2,5	10

Из приведенных в таблице данных следует, что по уровню эксплуатационных характеристик цементный бетон: сравним с гранитом; превосходит по показателю жесткости синтегран; имеет оптимальные стоимостные показатели среди всех рассматриваемых материалов.

Применительно к станкостроению значительным потенциалом обладает новое направление, связанное с разработкой интеллектуальных конструкционных материалов, способных реагировать на внешние воздействия. В случае достижения критического состояния они диагностируют возникновение опасных дефектов, а затем самостоятельно пытаются устранить последствия. Уникальные возможности материалам придают различными способами: специальными датчиками, сопряженными с приводами; включением в структуру капсул с биологическими субстанциями, неактивными в обычных режимах работы конструкции, и т.п.

В отечественной науке наиболее ранние исследования микроорганизмов и продуктов их метаболизма проводились в рамках развития геотехнологий, связанных с решением важных практических задач (закрепление грунтов, насыпей и фундаментов, уплотнение стенок скважин и т.п.). Однако существенных результатов развития в области получения новых видов материалов до настоящего времени не получено [3–5].

Нами исследовалась возможность применения в этом качестве биодобавки на основе микроорганизма вида *Bacillus cereus*, способной синтезировать коллоидальный

кальцит и вводимой совместно с предварительно дегидратированной микропористой кремнийсодержащей горной породой (опока, диатомит) [6]. Применение в качестве компонента биодобавки дегидратированной опоки с развитой микропористостью обеспечивает наличие свободного внутреннего объема для развития микроорганизмов *Vacillus cereus*, синтезирующих коллоидальный кальцит, который как самостоятельно, так и в результате взаимодействия с аморфным кремнеземом опоки накапливается в дефектах цементного камня, уплотняя и упрочняя его микроструктуру.

Можно предположить, что механизм, приводящий к упрочнению микроструктуры цементного камня, заключается в синтезе биогенного карбоната кальция в структуре микрокомпозита за счет метаболизма бактерий в щелочной среде твердеющего цемента. Известно, что процесс биогенной карбонизации происходит на протяжении всей жизнедеятельности организмов и возобновляется при последующем увлажнении. Этот феномен обуславливает возможность самовосстановления материала при нарушении его целостности в процессе эксплуатации. Экспериментально установлено наличие пластифицирующего эффекта и увеличение прочностных характеристик цементного камня на сжатие в ранних сроках твердения (40...45 %) [7, 8].

Определение влияния биодобавки на начальный период гидратации цемента проводили по изменению интенсивности выхода CaO в раствор (рис. 1).

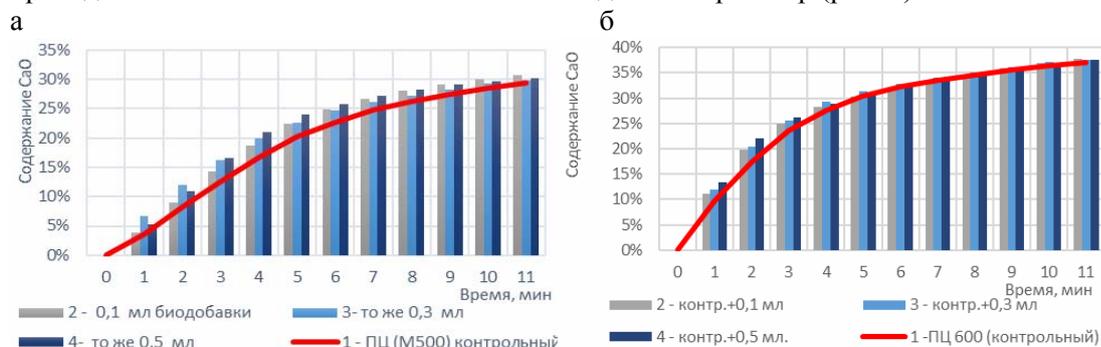


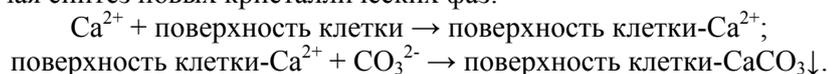
Рис. 1. Влияние концентрации биодобавки *B. Cerrius* на выход CaO в раствор гидратирующегося портландцемента: а – М500 (серый); б – М600 (белый)

На основании проведенных исследований выявлен положительный эффект от увеличения концентрации биодобавки. В первые 5 минут наибольшее увеличение активности получено при максимальных исследуемых концентрациях, а именно 0,3 мл и 0,5 мл. Этот аспект нужно учитывать при использовании цементных композиций, содержащих указанную биодобавку, в качестве сырьевой основы для изготовления газобетонов.

С учетом анализа ранее опубликованных результатов исследований было сделано предположение о двух возможных вариантах обоснования позитивного влияния биодобавки.

Первый основан на способности ряда микроорганизмов синтезировать в процессе жизнедеятельности неорганические вяжущие вещества, которые затвердевают с образованием прочных минеральных конгломератов. В основе процесса биоцементации лежит метаболизм живой клетки, протекающий с образованием коллоидального CaCO<sub>3</sub>. В результате эпитаксиального наращивания он формирует массивы кальцита и его полиморфных модификаций (арагонит, фатерит). Судя по специфике колонизации бактериями нового объекта, процесс биоцементации ускоряется по экспоненциальной зависимости, пока для этого присутствуют необходимые факторы (Ca<sup>2+</sup>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N, K<sup>+</sup> и др.) [9].

Ионы кальция способны притягиваться к поверхности клетки вследствие ее отрицательного заряда. В этом случае поверхность выступает в роли центра нуклеации, облегчая синтез новых кристаллических фаз:



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

Наиболее популярным в производстве конструкций из цементного литья является ультравысокопрочный бетон на вяжущем Nanodur Compound (Германия) [10]. Из него изготавливают фундаментные площадки для машин, станины и опорные элементы, устанавливаемые или встраиваемые в фундамент.

Для прецизионных применений существенно важной является долговременная стабильность конструкций. В этой связи была спроектирована установка, позволяющая проводить оценку деформаций ползучести высокофункциональных бетонов, используемых в станкостроении.

Традиционный метод исследования ползучести бетонов описан в ГОСТ 24544-81 и заключается в измерении линейного размера образцов-призм, находящихся в сжатом напряжённо-деформированном состоянии в течение всего времени испытаний. Нагрузка поддерживается пружинами сжатия. Трудности заключаются в большой материалоёмкости образцов и испытательных стенов. Для упрощения испытаний в актуальной версии ГОСТ 24544-2020 описан метод определения деформаций ползучести при изгибе. Рекомендуемые размеры образцов-балок 1100×100×70 мм. Предлагаемым усовершенствованием является испытание образцов-балочек длиной 300 мм. Конструктивные решения, заложенные при проектировании нового устройства (рис. 2), позволяют уменьшить требуемое количество датчиков перемещения до одного вместо трёх по существующей методике. Улучшение достигается за счёт установки штанги с датчиком непосредственно на образец (зона контакта расположена в точках нулевого прогиба образца), а не на каркас измерительного стенов. Устойчивость измерительной штанги при этом обеспечивается противовесами.

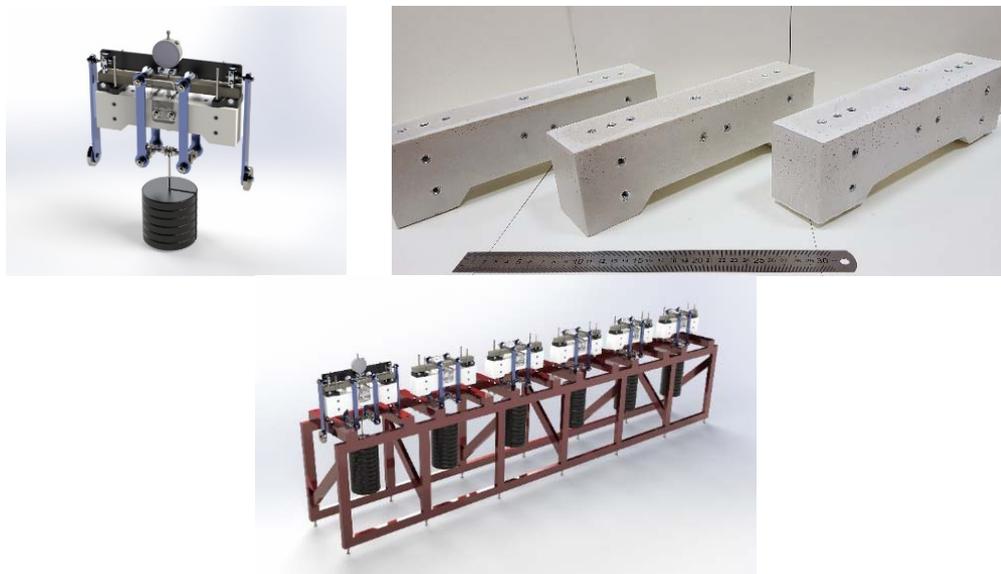
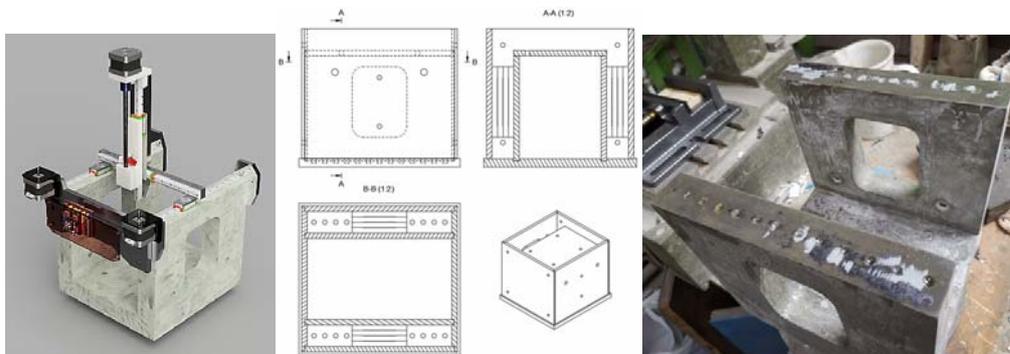


Рис. 2. Установка для исследования деформаций ползучести бетонов (слева направо): общий вид; станины из бетона; стенд для одновременного испытания 6 образцов

Характеристики установки: схема нагружения – четырёхточечный изгиб; размеры образцов – 300×19×28 мм; размеры установки – 350×200×110 мм; масса установки – 4,5 кг; погрешность измерения прогиба – 5 мкм; диапазон измерения прогиба – 0-10 мм; максимальная нагрузка – 50 кгс.

Апробация возможности использования высокопрочных бетонов в станкостроении проведена при проектировании и формовке бетонных станин в конструкциях испытательного оборудования [11, 12]: измерительного комплекса для исследования реологических параметров смесей методами вискозиметрии и рельефа поверхностей твёрдых материалов методом координатного 3D-сканирования (рис. 3, а); разрывной машины для испытания тонких гибких рулонных материалов, а также измерения величин их адгезии к различным основаниям (рис. 3, б).

а



б

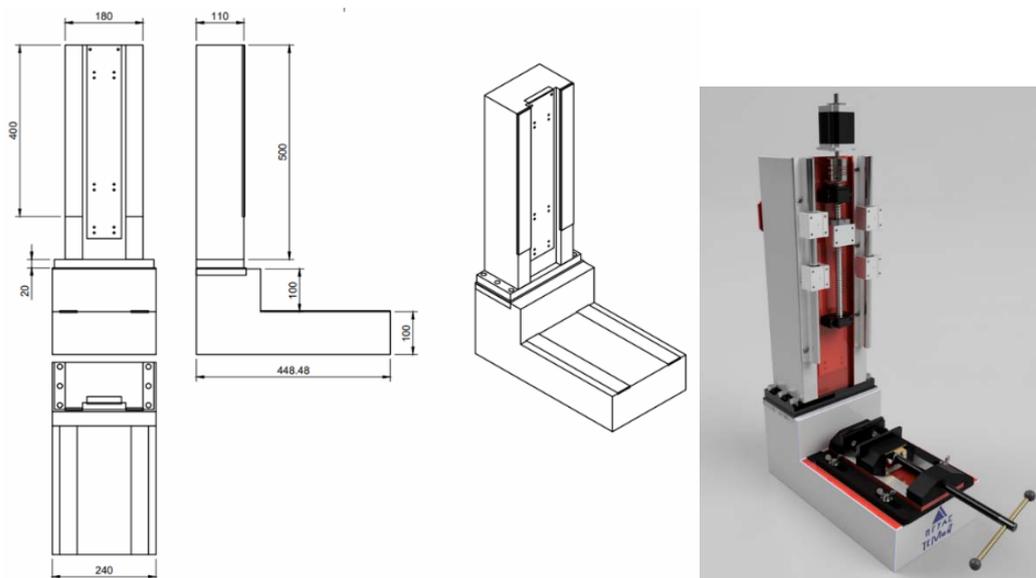


Рис. 3. Применение бетона в конструкциях измерительного оборудования:  
а – комплекс для измерения реологических показателей; б – разрывная машина

При проектировании испытательных машин использовались данные численного моделирования с учётом совместной работы бетонного композита, арматуры и анкеров закладных деталей. Так, при проектировании разрывной машины основным критерием оптимизации геометрических параметров и компоновки арматуры являлась деформация станины под действием предельной рабочей нагрузки и усадки (рис. 4). Для этого предварительно были подобраны составы бетонов с необходимыми свойствами.

В связи с развитием современных технологий компьютерного мультифизического моделирования открываются широкие возможности по оптимизации геометрических параметров деталей станков, в том числе с использованием методов «Generative design», что требует исследования полного спектра свойств материала и наличия точной информации о всех внешних статических и динамических нагрузках. В связи с чем на базе кафедры ТСМиД планируется создание прототипов металлорежущих станков с ЧПУ с железобетонными базовыми деталями, которые будут использоваться в дальнейших исследованиях.

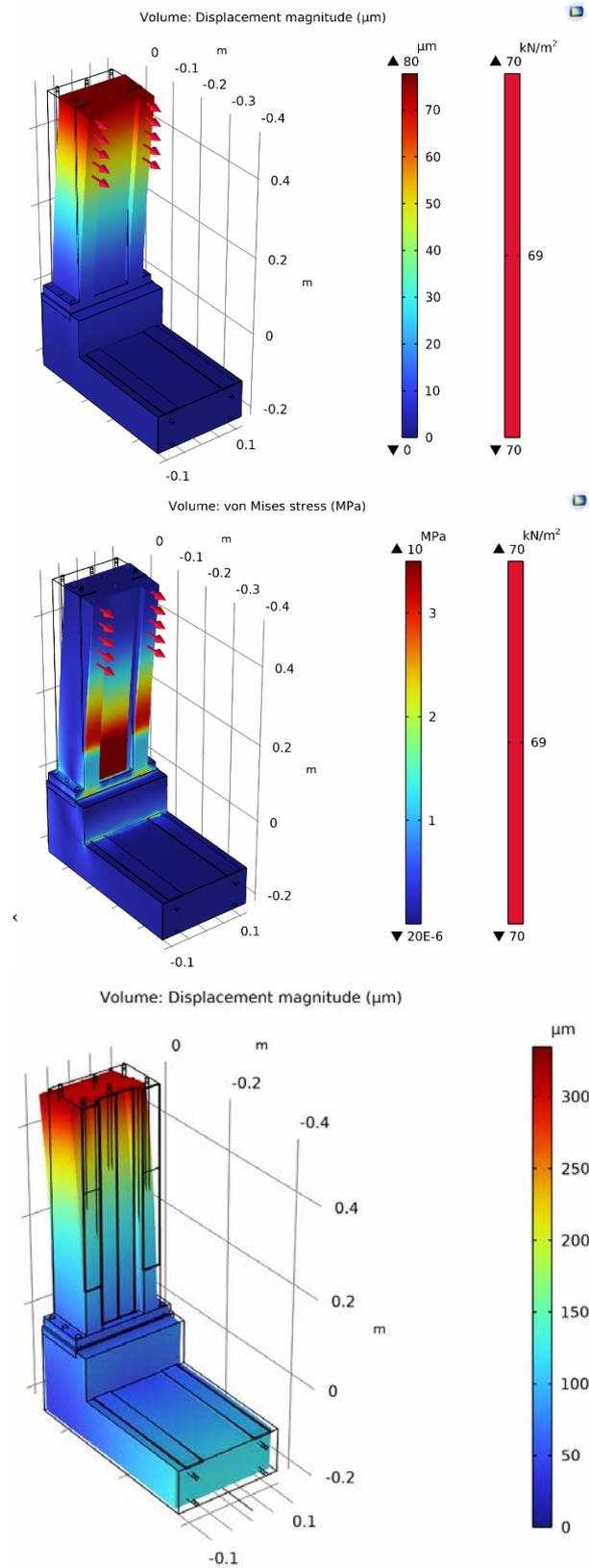


Рис. 4. Распределение напряжений и перемещений в станине разрывной машины (результаты получены в ПО COMSOL Multiphysics)

Анализ литературных источников, а также результаты собственных экспериментов по отливке станин испытательного оборудования из бетона показали, что применение

их высокофункциональных модификаций является технически целесообразным и экономически эффективным.

Отсутствие высокотемпературных процессов относится к важному преимуществу процесса изготовления бетонных базовых элементов станков в сравнении с чугунными или стальными. Это обуславливает применение такой технологии при выпуске небольших партий прецизионного обрабатывающего или измерительного оборудования, к конструкциям которого предъявляют повышенные требования по демпфированию вибраций, возникающих в процессе работы.

Положительный эффект с точки зрения увеличения прочности, установленный при введении биодобавки на основе *Bacillus cereus* в цементные бетоны, свидетельствует о перспективности продолжения исследований по ее использованию в составах интеллектуальных материалов, применяемых в элементах конструкций обрабатывающего оборудования.

#### Список литературы

1. Möhring 2014 : Möhring, H.-C., 2014, Advanced Materials for Machine Tool Structures, Proceedings of the 16th International Machine Tool Engineers' Conference (The 16th IMEC), 31. October - 01. November 2014, Tokyo, Japan.
2. Высоконаполненный композиционный материал – синтегран: патент № 2110539 от 10.05.1998 / Санина Г.С., Кузьмин Н.Н.
3. Van Tittelboom, C. Using Bacteria to Repair Cracks in Concrete / C. Van Tittelboom, N. De Beli, W. De Münck, V. Verstrate // Cement Concrete Research. – 2010. – 1(40). – P. 157–166.
4. Zemskov, S.V. Mathematical Model of the Bacterial Self-Repair of Cracks in Concrete / S.V. Zemskov, H.M. Yonkers, F.J. Vermolen // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2012. – 1(25). – P. 4–12;
5. Navnet, S. The effect of bacteria on compressive strength, water absorption, and fast permeability for concrete chlorides with fly ash / S. Navnet, S. Rafat, R. Anita // Building Materials. – 2012. – 1(28). – P. 351–356.
6. Биодобавка для строительных растворов и мелкозернистых бетонов: патент № 2773751 от 10.06.2022 / Береговой В.А., Капустин А.Е., Болдырев С.А. [и др.].
7. Beregovoy, V.A. Use of Bacterial Carbonatogenesis to Increase the Strength of Cement Solutions with the Help of Microorganisms / V.A. Beregovoy, A.E. Kapustin, A.M. Beregovoy // Key Engineering Materials. – 2021. – Vol. 887. – P 440–445. – DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.887.440].
8. Береговой В.А. Влияние добавки экзометаболитов микроорганизма *Bacillus Cereus* на прочность цементных растворов / В.А. Береговой, С.А. Болдырев, А.Е. Капустин, А.М. Субботин // Региональная архитектура и строительство. – 2020 – № 2. – С. 6–16.
9. Максимович, Н.Г. Биотехнологии в инженерной геологии / Н.Г. Максимович В.Т. Хмурчик // Инженерная геология. – 2014. – №3. – С.18–25.
10. Открытие завода по производству станин из ультравысокопрочного бетона в Китае // СРІ – Международное бетонное производство – 2017. – № 3. – С. 34–36.
11. Береговой В.А. Цифровые технологии в исследовании механических свойств тонкослойных материалов / В.А. Береговой, С.А. Болдырев, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 5–12.
12. 3D-принтер для печати строительной керамики / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1. – С. 32–37.

## References

1. Möhring 2014 : Möhring, H.-C., 2014, Advanced Materials for Machine Tool Structures, Proceedings of the 16th International Machine Tool Engineers' Conference (The 16th IMEC), 31. October - 01. November 2014, Tokyo, Japan.
2. Highly filled composite material – syntegran: patent No. 2110539 dated 10.05.1998 / Sanina G.S., Kuzmin N.N.
3. Van Tittelboom, C. Using Bacteria to Repair Cracks in Concrete / C. Van Tittelboom, N. De Beli, W. De Münck, V. Verstrate // Cement Concrete Research. – 2010. – 1(40). – P. 157–166.
4. Zemskov, S.V. Mathematical Model of the Bacterial Self-Repair of Cracks in Concrete / S.V. Zemskov, H.M. Yonkers, F.J. Vermolen // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2012. – 1(25). – P. 4–12;
5. Navnet, S. The effect of bacteria on compressive strength, water absorption, and fast permeability for concrete chlorides with fly ash / S. Navnet, S. Rafat, R. Anita // Building Materials. – 2012. – 1(28). – P. 351–356.
6. Bioadditive for mortars and fine-grained concrete: patent No. 2773751 of 10.06.2022 / Beregovoy V.A., Kapustin A.E., Boldyrev S.A. [etc.].
7. Beregovoy, V.A. Use of Bacterial Carbonatogenesis to Increase the Strength of Cement Solutions with the Help of Microorganisms / V.A. Beregovoy, A.E. Kapustin, A.M. Beregovoy // Key Engineering Materials. – 2021. – Vol. 887. – P 440–445. – DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.887.440].
8. Beregovoy, V.A. The effect of the addition of exometabolites of the bacterium *Bacillus Cereus* on the strength of cement mortars / V.A. Beregovoy, S.A. Boldyrev, A.E. Kapustin, A.M. Subbotin // Regional architecture and engineering. – 2020 – No. 2. – P. 6–16.
9. Maksimovich, N.G. Biotechnology in engineering geology / N.G. Maksimovich, V.T. Khmurchik // Engineering geology. – 2014. – N. 3. – P.18–25.
10. Opening of a plant for the production of ultra-high-strength concrete stans in China // CPI – International Concrete Production. – 2017. – No. 3. – C. 34–36.
11. Beregovoy, V.A. Digital technologies in the study of mechanical properties of thin-layer materials / V.A. Beregovoy, S.A. Boldyrev, I.Yu. Lavrov // Regional architecture and engineering. – 2020 – No. 4. – P. 5–12.
12. 3D-printer for printing construction ceramics / V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1. – P. 32–37.

УДК 001.8+007.5: 69

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_26

*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

## ОБЩАЯ СХЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ И СИНТЕЗА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Предлагается общая схема рациональной идентификации и синтеза материалов. Приводятся результаты комбинированных исследований: когнитивное моделирование материалов как слабоструктурированных систем; модифицированные методы экспертных оценок; оценка структуры материала как общей статистической задачи распознавания образов; последовательный анализ в оценке структуры; параметрические и непараметрические методы оценки свойств материалов; формализация кинетических процессов на основе решения общей и частной задач идентификации; параметрические модели в формализованной оценке свойств материалов; управление качеством материалов; минимизация размерности критериального пространства и многокритериальная оптимизация. Указывается применение методологии при разработке и управлении качеством материалов специального назначения.

*Ключевые слова: композиты, сложные системы, синтез, идентификация, управление, методы, реализация*

## GENERAL SCHEME OF IDENTIFICATION AND SYNTHESIS OF BUILDING MATERIALS

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

A general scheme of rational identification and synthesis of materials is proposed. The results of combined studies are given: cognitive modeling of materials as semi-structured systems; modified methods of expert assessments; assessment of the structure of the material as a general statistical task of pattern recognition; consistent analysis in the assessment of the structure; parametric and non-parametric methods for assessing the properties of materials; formalization of kinetic processes based on the solution of general and particular problems of identification; parametric models in the formalized assessment of the properties of materials; material quality management; minimization of criteria space dimension and multi-criteria

optimization. The application of the methodology in the development and quality management of materials for special purposes is indicated.

*Keywords:* composites, complex systems, synthesis, identification, control, methods, implementation

Главным объединяющим началом в материаловедении является единый стиль мышления и признания определенных фундаментальных теорий и методов. Содержательную часть парадигмы составляет система научных взглядов, основанных на базовых модельных представлениях, определяющих весь набор методологических, теоретических и экспериментальных положений. Синтез материала как сложной системы [1] начинается с когнитивного моделирования [2, 3]. В качестве субъекта идентификации [4, 5] выступает группа специалистов, способная выполнить необходимые операции при реализации процесса. Когнитивная модель позволяет произвести декомпозицию материала и приближенно свести синтез целостной системы к синтезу подсистем. Предполагается существование истинной математической модели, позволяющей заменить объект идентификации во всех необходимых случаях. Выбор математической модели свойства связан со структурной и параметрической идентификацией [6...9] (класс некорректных задач). Практически реализуется комплексное системное решение задачи идентификации при должном осознании роли и функций человека в процессе идентификации.

Накоплен значительный опыт конструирования сложных систем на основе системного подхода [10, 11]. Здесь низшим уровнем представления системы является описание ее в терминах классов (со своими атрибутами и операциями) и соответствующих им объектов, выступающих в качестве микроскопических элементов, и отношений между ними, играющих роль связей. Высшим уровнем будет интеграция отдельных систем, рассматриваемых макроскопическими элементами. Полезными будут лишь те математические выкладки, которые сформулированы с учетом важных системообразующих факторов (изоμοфность). Усложнение решаемых задач приводит лишь к увеличению сложности и стоимости проектирования: возрастают трудоемкость изготовления и время полного цикла создания. Практическая реализация специальных методов идентификации и обработки экспериментальных данных, а также разработка функционалов качества рассматривались в [2, 12].

Оптимизация рецептурно-технологических параметров при выбранной иерархии критериев осуществлялась с использованием итеративного способа снижения размерности критериального пространства при одновременном определении совокупности независимых частных критериев с отысканием многомерного эллипсоида рассеяния эмпирических данных в факторном пространстве. Общих правил выбора числа значимых компонент не существует: определяется величинами собственных значений матрицы ковариаций, задачами исследования, интуицией исследователя и т.п. Эффективность метода подтвердилась, в частности, и при решении задач управления качеством лакокрасочных покрытий [13]. Связь характеристик материала с параметрами модели определялась по экспериментальным данным. Обоснование раздельного формирования отдельных структур с возможностью создания уникальных композитов на мало- или несовмещающихся компонентах производилось в соответствии со схемой на рис. 1.

Здесь одному и тому же показателю свойств (например, прочности) могут соответствовать различные микро- и макроструктуры. Оптимизация каждого структурного уровня осуществляется на основе выделенных критериев.

Изоморфизм/гомоморфизм позволяют выявленные системные свойства одной системы переносить на другие. Проблема оптимизации сводится к экстремизации функционала (в общем случае векторного). Когнитивная карта фактически определяет алгоритм синтеза композиционного материала (рис. 2). Каждое из свойств (критерии качества) является интегральной характеристикой материала, зависящей от свойств компонентов, состава, условий приготовления, твердения; учитывались: стойкость, теплостойкость, сопротивление удару и истиранию; радиационно-защитные, адгезионные свойства; защитные свойства по отношению к стальной арматуре и др. Такой подход позволил разработать конкурентоспособные радиационно-защитные и коррозионно-стойкие материалы [14, 15].

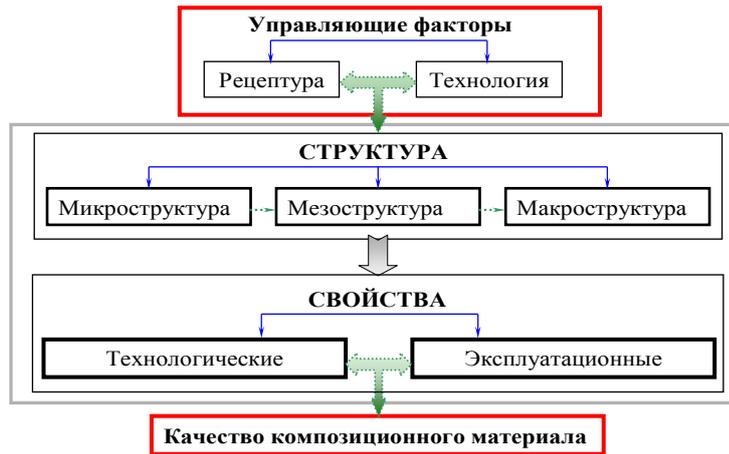


Рис. 1. К конструированию композиционного материала (по В.И. Соломатову)

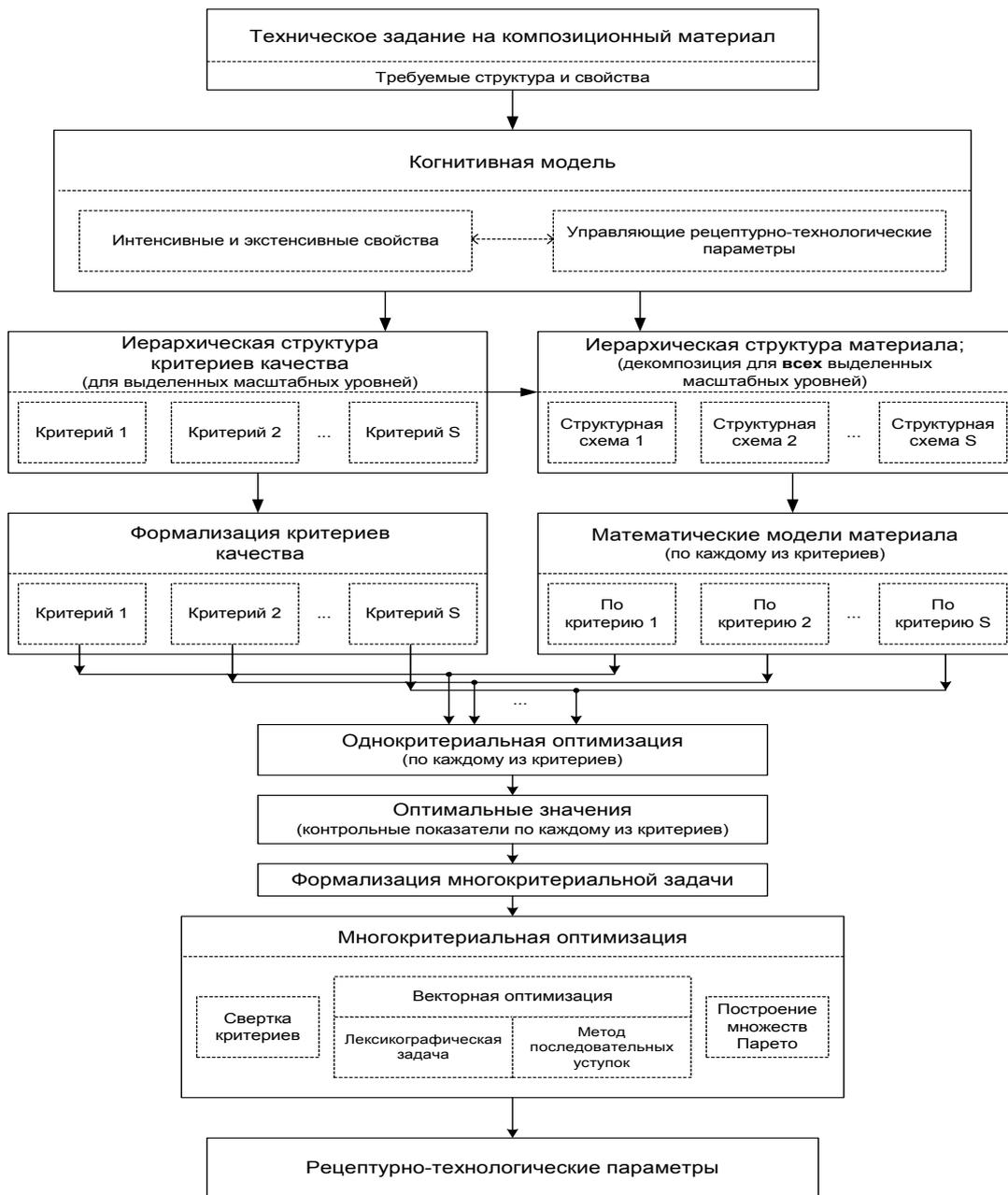


Рис. 2. Алгоритм синтеза композиционного материала

При выборе модели исходя из цели структурного описания объекта, границ масштабного уровня, выделенного приоритетного ряда элементов структуры, целевого назначения объекта анализа учитывались закономерности процессов каждого уровня. Предполагалось, что структурная организация материала предопределяет структурное оформление изделия или конструкции и функциональные свойства всей системы. Проектирование системы в целом базируется на иерархической структуре ее критериев качества (каждое индивидуальное свойство получается при разных наборах структурных составляющих).

Систематизация исследований, направленная на построение обобщенных моделей структурообразования строительных композитов, классифицированных по виду компонента, обеспечивающего формирование искусственного камня, обеспечит фундаментальное развитие строительного материаловедения и создание новых технологий.

#### Список литературы

1. Гарькина, И.А. Строительные материалы как системы / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С.55–58.
2. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Известия ВУЗов. Строительство. – 2009. – №3–4. – С. 30–37.
3. Абрамова, Н.А. Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт / Н.А. Абрамова, С.В. Коврига // Проблемы управления. – №6. – 2008. – С. 23–33.
4. Кузнецов, О.П. Анализ влияний при управлении слабоструктурированными ситуациями на основе когнитивных карт / О.П. Кузнецов, А.А. Кулинич, А.В. Марковский // Человеческий фактор в управлении / под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. – М.: КомКнига, 2006. – С.313–344.
5. Дорофеюк, Ю.А. Структурно-классификационные методы анализа и прогнозирования в крупномасштабных системах управления / Ю.А. Дорофеюк // Проблемы управления. – 2008. – №4. – С.78–84.
6. Современные методы идентификации систем: пер. с англ./ под ред. П.Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
7. Кендалл, М. Статистические выводы и связи / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1973. – 899 с.
8. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление: монография / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М., 1974. – 405 с.
9. Айвазян, С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
10. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
11. Прангишвили, И.В. Поиск подходов к решению проблем / И.В. Прангишвили, Н.А. Абрамова, В.Ф. Спиридонов [и др.]. – М.:СИНТЕГ, 1999. – 192 с.
12. Гарькина, И.А. Формализация оценки структуры и свойств композиционных материалов специального назначения / И.А. Гарькина // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С.69–71.
13. Данилов, А.М. Анализ показателей лакокрасочных покрытий методом главных компонент / А.М. Данилов, В.И. Логанина, В.А. Смирнов // Известия КГАСУ. – 2009. – №1 (11). – С.243–246.
14. Гарькина, И.А. Управление качеством материалов со специальными свойствами / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Проблемы управления. – 2008. – №6. – С. 67–73.
15. Гарькина, И.А. Преодоление неопределенностей целей в задачах многокритериальной оптимизации на примере разработки сверхтяжелых бетонов для защиты от

радиации / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев, В.А. Смирнов // Строительные материалы. НАУКА. – 2006. – № 8. – С.23–26.

### References

1. Garkina, I.A. Building materials as systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2006. – № 7. – P.55–58.
2. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Izvestiya VUZov. Construction. – 2009. – № 3–4. – P. 30–37.
3. Abramova, N.A. Some criteria for the reliability of models based on cognitive maps / N.A. Abramova, S.V. Kovriga // Problems of management. – 2008. – № 6.– P. 23–33.
4. Kuznetsov, O.P. Analysis of influences in the management of semi-structured situations based on cognitive maps / O.P. Kuznetsov, A.A. Kulinich, A.V. Markovsky // Human factor in management / ed. N.A. Abramova, K.S. Ginsberg, D.A. Novikov. – M.: KomKniga, 2006. – P.313–344.
5. Dorofeyuk, Yu.A. Structural-classification methods of analysis and forecasting in large-scale control systems / Yu.A. Dorofeyuk // Problems of control. – 2008. – №4. – P.78–84
6. Modern methods of system identification: trans. from English / ed. P. Eickhoff. – M.: Mir, 1983. – 400 p.
7. Kendall, M. Statistical inferences and connections / M. Kendall, A. Stuart. – M.: Science, 1973. – 899 p.
8. Box, J. Analysis of time series. Forecast and management: monograph / J. Box, G. Jenkins. – M., 1974. – 405 p.
9. Aivazyan, S.A. Applied statistics. Classification and dimensionality reduction / S.A. Aivazyan, V.M. Buchstaber, I.S. Enyukov, L.D. Meshalkin. – M.: Finance and statistics, 1989. – 607 p.
10. Prangishvili, I.V. System approach and system-wide regularities / I.V. Prangishvili. – M.: SINTEG, 2000. – 528 p.
11. Prangishvili, I.V. Search for approaches to solving problems / I.V. Prangishvili, N.A. Abramova, V.F. Spiridonov. – M.: SINTEG, 1999. – 192 p.
12. Garkina, I.A. Formalization of the assessment of the structure and properties of composite materials for special purposes / I.A. Garkina // Construction materials. – 2007. – № 1. – P.69–71.
13. Danilov, A.M. Analysis of indicators of paint and varnish coatings by the method of principal components / A.M. Danilov, V.I. Loganina, V.A. Smirnov // Izvestiya KGASU. – 2009. – №1 (11). – P.243–246.
14. Garkina, I.A. Quality control of materials with special properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Control Sciences. – 2008. – №6. – P. 67–73.
15. Garkina, I.A. Overcoming the Uncertainties of Goals in Problems of Multicriteria Optimization on the Example of the Development of Superheavy Concrete for Radiation Protection / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev, V.A. Smirnov // Stroitelnye materialy. THE SCIENCE. – 2006. – №8. – P.23–26.

УДК 691.327

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_31

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

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

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

**Селяев Павел Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Лазарев Александр Львович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: aleks-laz@yandex.ru

**Грязнов Сергей Юрьевич**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: sergey.gryaznov.97@mail.ru

**Аверкина Маргарита Юрьевна**,  
студентка 4-го курса, специальность  
«Строительство уникальных зданий  
и сооружений»  
E-mail: margo\_averkina@mail.ru

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

Russia, 430005, Saransk, 68,  
Bolshevistskaya St.

**Selyaev Vladimir Pavlovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Academician of  
the Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences, Head of the  
Department «Building Structures»  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Selyaev Pavel Vladimirovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Building Structures»  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Lazarev Aleksander Lvovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Building Structures»  
E-mail: aleks-laz@yandex.ru

**Gryaznov Sergey Yurievich**,  
Postgraduate student of the Department  
«Building Structures»  
E-mail: sergey.gryaznov.97@mail.ru

**Averkina Margarita Yurievna**,  
4<sup>th</sup> year student, specialty «Construction of  
unique buildings and structures»  
E-mail: margo\_averkina@mail.ru

## ФРАКТАЛЬНАЯ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, A.L. Lazarev, S.Yu. Gryaznov, M.Yu. Averkina

Представлены результаты исследования процесса разрушения цементных бетонов под действием сжимающей нагрузки. Экспериментально получены диаграммы деформирования бетона, анализ которых подтверждает многомасштабность, многостадийность процесса разрушения. Подтверждена гипотеза о фрактальном строении структуры бетона. По экспериментальным данным определены: фрактальная размерность структуры бетона; квант энергии разрушения. Показано, что на диаграмме деформирования можно выделить шесть этапов, характеризующих процесс разрушения структуры бетона при сжатии.

*Ключевые слова: фрактал, деформирование, бетон, квантово-механическая модель, разрушение*

## FRactal Quantum-Mechanical Model of Concrete Deformation and Destruction.

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, A.L. Lazarev, S.Yu. Gryaznov, M.Yu. Averkina.

The article presents the results of study the process of destruction of cement concrete under the action of compressive loading. Concrete deformation diagrams are experimentally obtained, the analysis of which confirms the multiscale, multistage nature of the destruction process. The hypothesis about the fractal structure of the concrete structure was confirmed; energy quantum of destruction was determined. It is shown that six stages can be distinguished on the deformation diagram, characterizing the process of destruction of the concrete structure during compression.

*Keywords: fractal, deformation, concrete, quantum mechanical model, destruction*

**Введение.** Расчетные модели разрушения изделий из бетона в настоящее время формируются на классических представлениях о материале как об идеально однородной и непрерывной среде. Гипотезы о сплошности и однородности структуры бетона с учетом ряда ограничений, допущений, предельных переходов дают возможность применять к анализу процесса разрушения конструкций, изделий из бетона расчетные методы нелинейной механики деформируемого твердого тела [1–5].

Однако экспериментально установлено, что структура твердого тела из камня, бетона, металла имеет дискретное строение, отличающееся многомасштабностью, разнообразием свойств компонентов [1, 3, 6–9].

Структура бетона представлена тремя фазовыми состояниями вещества: твердым, жидким, газообразным. Химический, элементарный и минералогический состав структуры формируется как в процессе изготовления за счет применения различных наполнителей, заполнителей, модифицирующих добавок, изменения условий твердения цементного вяжущего, так и в процессе эксплуатации [1–5].

При всем многообразии структурных компонентов, форм, неправильностей и фрагментарности методами фрактального анализа установлено проявление рекурсии – подобия, повторяемости структурных образований по форме и свойствам на разных масштабных уровнях [10–16].

Современный бетон предлагается рассматривать как композит, состоящий из двух и более компонентов, синергизм которых обеспечивает новые и более высокие качества, не присущие исходным компонентам [13–16].

Структура бетона формируется в виде иерархически организованной, масштабно-инвариантной системы, которая на каждом масштабном уровне подобна целому и может быть представлена двумя обобщенными компонентами – матрицей и наполнителем [13–15].

Разрушение бетона представляет собой кинетический процесс, протекающий во времени и пространстве на разных масштабных уровнях. Развитие процесса разрушения бетона многостадийно и зависит от вида, свойств, расположения, концентрации компонентов [14–16].

В работах В.В. Новожилова, Ю.В. Петрова, М.А. Садовского для описания процесса разрушения твердых тел предлагаются квантово-механические модели, построение которых основано на гипотезах: о дискретном строении вещества – твердое тело есть совокупность элементарных осцилляторов; о дискретном характере выделения и поглощения энергии – энергия выделяется и поглощается элементарными порциями, квантами; о принципе соответствия – в предельных случаях квантовая теория не противоречит классической [12, 17, 18].

Для развития квантово-механического подхода к моделированию прочности, деформирования и процесса разрушения бетона необходимо: выделить основные элементы структуры конечного размера – фракталы, свойства которых подобны свойствам материала в объеме; экспериментально обосновать модель квантового разрушения структуры в бетоне; подтвердить многомасштабность и самоподобие структурных элементов различного уровня, многостадийность процесса разрушения.

**Фрактальность строения структуры бетона.** Структура бетона рассматривалась во многих работах. Наиболее характерное описание с учетом статистической интерполяции структуры бетона представлено в работах [1–5, 9, 13–15]. Описание структуры бетона методами фрактальной геометрии впервые предпринято В.П. Селяевым, Т.А. Низиной, Л.И. Куприяшкиной, Л.М. Ошкиной [13, 14, 16, 19, 20]. За основу структуры принят характерный элемент – фрактал, свойства которого адекватны свойствам массива и который, в свою очередь, состоит из начальных элементов. Начальный элемент – носитель геометрических, физических свойств бетона – состоит из одного зерна наполнителя, одной прослойки матрицы и дефектов. Начальный элемент также может состоять из одного, двух, трех и т.д. подэлементов.

Экспериментально в работах Н.И. Карпенко показаны неоднородность напряжений в структуре материала, наличие градиента свойств и напряжений, их влияние на механические свойства [1]. Бергом О.Я. предложено различать дефекты-трещины;

окамляющие (контактные): внутризерновые и в матрице. Рассмотрено их влияние на процесс разрушения, диаграмму деформирования [3]. На основании результатов анализа структуры предложен принцип моделирования работы изделия из бетона с применением методов конечных элементов и классической механики деформированного твердого тела [1].

Учеными школы В.И. Соломатова разрабатывались модели структуры бетона исходя из принципа «структура в структуре», «композит в композите». Предполагалось, что на каждом масштабном уровне структура материала представлена матрицей и наполнителем [13, 14]. Подобные подходы развивались в работах Е.М. Чернышова [15].

Теория разрушения композиционных материалов наибольшее развитие и научное обоснование получила в работах по физике разрушения и механике металлов на основе теории дислокаций [6–8, 18, 19]. В этих работах структура материала рассматривается в виде неоднородной системы, в которой имеются самые разнообразные включения, релаксационные и дилатационные центры, дефекты, дислокации [8].

Исходя из анализа литературных и экспериментальных данных можно утверждать: структура бетона, металла, как и структура многих других материалов, формируется на различных масштабных уровнях из блоков (фракталов), подобных по свойствам основному массиву. Принцип многомасштабной инвариантности структуры характерен для фрактальных систем. Под фракталом, по Б. Мандельброту, принято понимать частное, подобное целому [11]. На любом масштабном уровне фрактал – структурный элемент бетона, который можно представить в виде системы из матрицы, включений и микротрещин (рис. 1).

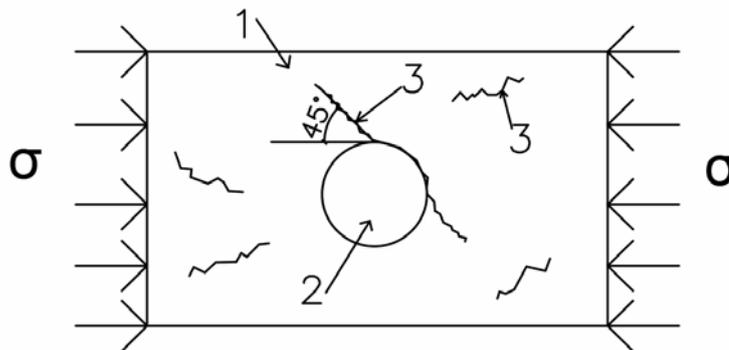


Рис. 1. Фрактал – структурный элемент:  
1 – матрица; 2 – зерно заполнителя; 3 – трещина

В зависимости от масштабного уровня матрица может быть представлена: на первом макроуровне – крупнозернистым бетоном; на втором мезоуровне – цементно-песчаным раствором; на третьем микроуровне – цементной мастикой с тонкодисперсным наполнителем; на четвертом наноуровне – цементным камнем (микробетон, по Юнгу).

Включения в бетоне представлены: зернами заполнителя, наполнителя, кластерами, которые различаются по размерам, жесткости, прочности; пустотами (норами, раковинами), которые могут быть заполнены воздухом, водой или другими веществами; трещинами технологическими, силовыми, структурными, внутризерновыми, матричными.

Напряжения, деформации в бетоне по величине также зависят от масштабного уровня: средние по объему, площади; локальные, сосредоточенные усредненные по объему фрактала; сконцентрированные в устье трещины.

Для экспериментального подтверждения фрактального строения и инвариантности структуры бетона были определены фрактальные размерности на различных масштабных уровнях. Размерность фрактала (размерность Хаусдорфа – Безиковича) есть величина дробная (в отличие от топологической размерности) и является объективной оценкой степени неоднородности структуры материала.

Фрактальная размерность структуры бетона определялась по экспериментальным данным распределения микротвердости материала в пределах площади поперечного сечения образца [13, 20].

На рис. 2 представлен профиль распределения микротвердости цементного композита, измеренной в пределах площади поперечного сечения образца. Фрактальная размерность определялась методом покрытия поверхности геометрическими метриками [21].

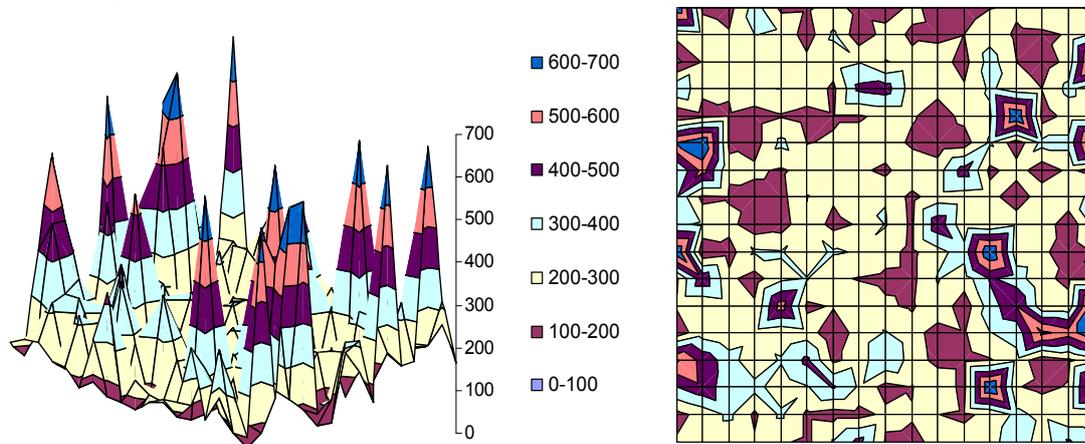


Рис. 2. Распределение микротвердости по поверхности наполненных диатомитом цементных композитов (скорость перемешивания – 120 об/мин, время перемешивания – 20 с)

Установлено, что фрактальная размерность  $D$  изменяется в интервале от 2,03 до 2,5; численное значение  $D$  зависит от степени наполнения, крупности частиц наполнителя и не зависит от масштабного уровня анализируемых структур (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Зависимость фрактальной размерности от соотношения песок/цемент

№ п/п	Состав цементного композита		$D_1$	$D_2$
	В/Ц	песок/цемент		
1	0,6	1/1	2,03	2,03
2	0,6	2/1	2,42	2,40
3	0,6	4/1	2,55	2,47

$D_1$  и  $D_2$  – фрактальная размерность при соответствующем увеличении в 10 и 20 раз.

Изменение фрактальной размерности адекватно отражает изменение физико-механических свойств композита (рис. 3).

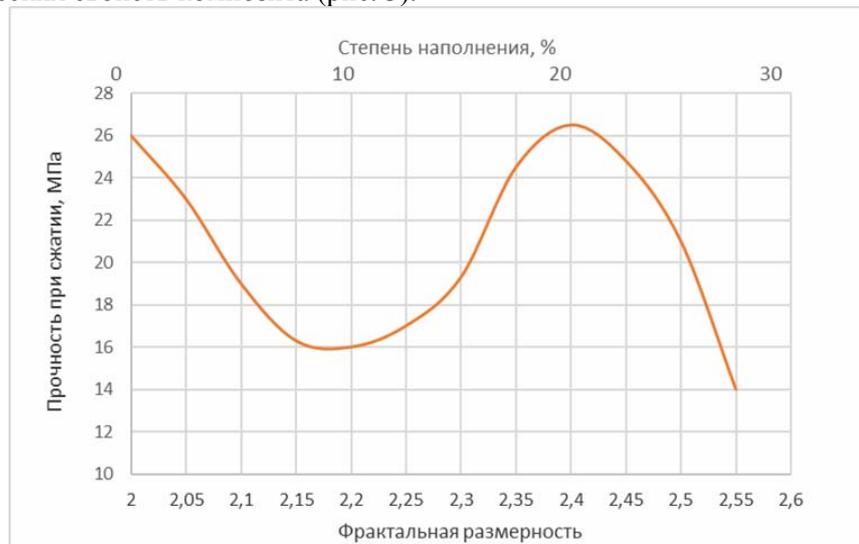


Рис. 3. Зависимость между фрактальной размерностью и прочностью при сжатии

**Диаграмма деформирования бетона при сжатии.** Гипотеза о фрактальном строении структуры бетона наглядно подтверждается при испытании кубов из бетона на сжатие при скорости нагружения 0,5 мм/мин и частоте фиксирования изменения деформаций – 600 измерений в минуту. Наиболее характерный вид диаграммы деформирования приведен на графиках (рис. 4).

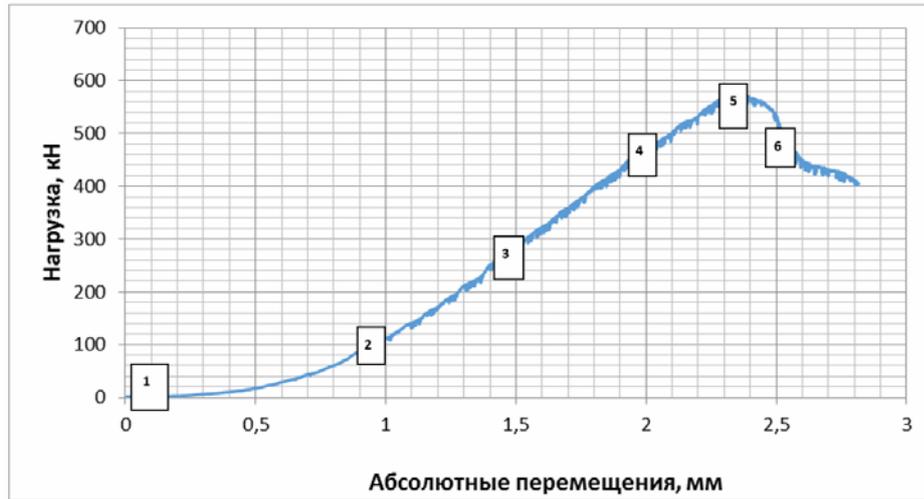


Рис. 4. Диаграмма зависимости нагрузки от перемещения (скорость нагружения 0,5 мм/мин, частота сбора данных 0,1 с)

На диаграмме деформирования четко прослеживается дискретный характер разрушения бетона при сжатии. Повышение напряжений с ростом деформаций чередуется их сбросом и образованием петель, появление которых можно объяснить ростом микротрещин до встречи с заполнителем-демпфером или элементарным актом разрушения фракталов. Рост трещины на масштабном уровне макроструктуры сопровождается разрушением фракталов на масштабном уровне мезо- или микроструктуры. Поэтому каждый сброс нагрузки и образование петель можно рассматривать как отказ (разрушение) фрактала или группы фракталов на соответствующем масштабном уровне. При этом на диаграмме деформирования можно выделить несколько этапов, каждому из которых соответствуют определенные значения кванта энергии разрушения и фрактальной размерности (рис. 5).

Анализируя графики деформирования бетона при сжатии, можно заметить изменение интенсивности разрушения (отказов) – числа отказов структурных элементов в единицу времени.

Интенсивность отказов  $\lambda_i$  определяли по формуле

$$\lambda_i = \frac{j(\Delta t_i)}{(m-j)\Delta t} = \frac{j(\Delta \varepsilon_i)}{(m-j)\Delta \varepsilon},$$

где  $j$  – общее число отказавших элементов за время  $\Delta t$ ;  $j(\Delta t_i)$  – число отказов за промежуток времени  $\Delta t$ ;  $m$  – начальное число элементов в системе.

При анализе условно принят за отказ каждый сброс нагрузки, свидетельствующий о разрушении фракталов (или группы) на некотором масштабном уровне.

Анализируя экспериментальные данные, представленные на рис. 4, 5, 6 и в табл. 2, можно утверждать, что разрушение бетона при сжатии является многомасштабным, многоуровневым и многостадийным.

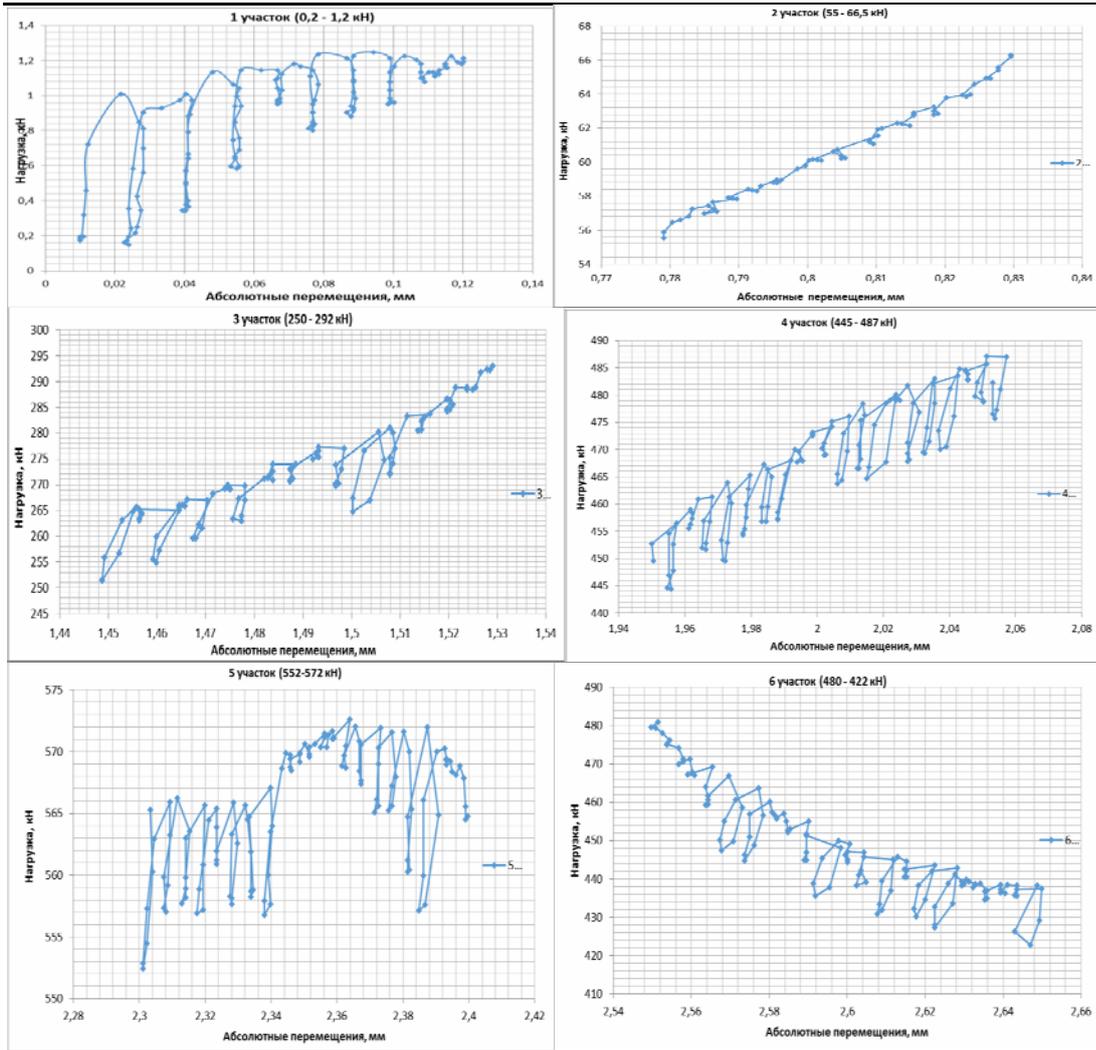


Рис. 5. Диаграммы деформирования на участках 1, 2, 3, 4, 5, 6

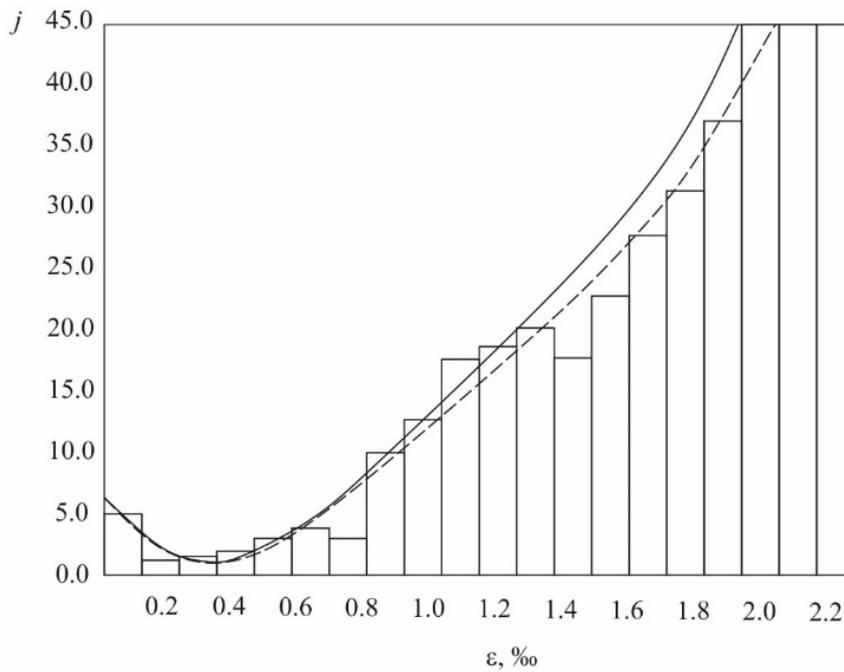


Рис. 6. Гистограмма частоты отказов в интервале  $\Delta\epsilon$  с ростом деформаций  $\epsilon$ , %

## Изменение показателей фрактальных структур при деформировании цементных бетонов нагрузкой сжатия

Показатель \ Номер участка		1	2	3	4	5	6
Фрактальная размерность		1,39	1,0	1,3	1,37	1,31	1,22
Оценка энергии кванта разрушения E, мДж	min	1,51	0	1,4	2,4	35,2	42
	max	5,4	0	60	19	39,0	57

Фрактальная размерность имеет максимальное значение на первом этапе испытаний, и это можно объяснить наличием в структуре случайных слабых (рыхлых) элементов, что подтверждается минимальными значениями энергии кванта разрушения (1,5–5,4 мДж). Фрактальная размерность, близкая к единице, свидетельствует о некоторой однородности структуры в процессе нагружения. При повышении фрактальной размерности с ростом деформаций и нагружения начинается процесс разрушения структуры. Судя по уровню энергии кванта разрушения, дискретность структуры повышается за счет разрушения слабых структурных элементов на уровне микроструктуры (энергия кванта на уровне 1,5–19 мДж). Повышение фрактальной размерности сопровождается ростом энергии кванта разрушения, что свидетельствует о накоплении дефектов в процессе разрушения структуры. Рост фрактальной размерности, энергии кванта разрушения хорошо коррелируется с ростом интенсивности отказов структурных элементов – фракталов.

**Процесс разрушения фрактальной структуры бетона при сжатии.** В отличие от статической концепции будем представлять разрушение бетона как кинетический процесс, идущий в пространстве и времени и являющийся многомасштабным (многоуровневым), многостадийным и самоподобным.

Структура бетона имеет дискретное строение и состоит из совокупности фракталов, пространственных элементарных блоков различного размера, подобных целому на каждом масштабном уровне. Каждому масштабному уровню фрактала соответствует определенный размер трещины. Трещины имеют различные размеры, различную ориентацию в пространстве.

Разрушение начинается с роста размеров трещины в структурном элементе на соответствующем иерархическом уровне под действием локальных напряжений, сконцентрированных в устье трещины.

Разрушение начинается с трещины, которая может находиться в матрице или заполнителя (включении). Рост трещины в матрице обычно развивается от одной границы включения до другой, может происходить вдоль поверхности контакта зерен заполнителя с матрицей. Поэтому форма трещины в бетоне имеет ступенчатый, извилистый характер. Если на пути развития трещин встретится включение в виде поры или включение-демпфер, жесткость которого более низкая, чем жесткость матрицы, то происходит сброс энергии роста. Подобные включения в металловедении называют центрами релаксации.

Если на пути роста трещины оказывается включение с высокой жесткостью (энергетический барьер в виде зерна заполнителя или кластера – центр дилатации), то возможны остановка роста и изменение направления дальнейшего развития трещины. Энергетический барьер (центр дилатации) препятствует росту трещины до тех пор, пока не накопится нужный уровень энергии. Чем больше энергетических препятствий на пути развития трещины, тем более значительна возможность повышения прочности бетона. Процесс сброса и повышения напряжений в процессе развития трещин (в металловедении – дислокаций) отображается на диаграмме деформирования в виде образования петель (см. рис. 5).

Процесс разрушения изделия из бетона состоит из элементарных актов разрушения структурных элементов на соответствующих масштабных уровнях и продолжается до

тех пор, пока плотность разрушения фракталов не достигнет критического уровня, и завершается формированием магистральной трещины.

Многостадийность процесса разрушения бетона хорошо отражается на диаграммах деформирования, записанных при испытании кубов на сжатие при постоянной скорости роста деформаций сжатия и автоматической записи деформаций с частотой 10-100 измерений в секунду.

На первой стадии происходит разрушение наиболее слабых структурных элементов, которые имеют дефекты, полученные в процессе изготовления.

На второй стадии наблюдается повышение плотности структуры материала; напряжения и деформации на уровне наноструктурных элементов в цементном камне достигают максимальной величины в устье трещины. Материал работает в упругой стадии без разрушения структурных элементов.

На третьей стадии развиваются пластические деформации, что связано с разрушением фракталов на уровне микроструктурных элементов в объеме, соизмеримом с крупностью частиц наполнителя; разрушаются в основном слабые фракталы.

На четвертой стадии появляются пластические деформации, обусловленные ростом напряжений на уровне макроструктурных элементов в объеме, соизмеримом с размерами зерна наполнителя. Заметно повышение частоты разрушения фрактальных структур. Формируется магистральная трещина.

На пятой стадии происходят формирование новых магистральных трещин, их объединение, разделение объема на частично связанные блоки. Заметно повышается уровень энергии, необходимый для разрушения фрактальных структур.

На шестой стадии в процессе деформирования развиваются процессы: разрушения блоков; образования поверхностей разрушения; отделения блоков от общего объема.

#### **Выводы**

1. Установлено, что структура бетона формируется в виде иерархически организованной, масштабно-инвариантной системы, которая на каждом масштабном уровне подобна целому, что подтверждается значениями фрактальной размерности.

2. Гипотеза о фрактальном строении структуры подтверждается при испытании бетона на сжатие при скорости нагружения 0,5 мм/мин и частоте фиксирования соответствующих деформаций и усилий 600 измерений в минуту.

3. По экспериментальным диаграммам деформирования определены значения кванта энергии разрушения и выделено 6 этапов деформирования.

#### **Список литературы**

1. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М. Стройиздат, 1996. – 416 с.
2. Ахвердов, И.Н. Теоретические основы бетоноведения / И.Н. Ахвердов. – Минск: Вышэйш. школа, 1991. – 188 с.
3. Новое о прочности бетона / А.А. Гвоздев, С.А. Дмитриев, С.М. Крылов [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. К.В. Михайлова. – М: Стройиздат, 1977. – 272 с.
4. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писаренко. – М. Стройиздат, 1971. – 208 с.
5. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона: монография / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 412 с.
6. Финкель, В.М. Физика разрушения: рост трещин в твердых телах / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
7. Партон, В.В. Механика упругопластического разрушения / В.В. Партон, Е.М. Морозов. – М.: Издательство Наука, 1974. – 416 с.
8. Немец, Я. Жесткость и прочность стальных деталей / Я. Немец. – М.: Машиностроение, 1970. – 528 с.
9. Гузеев, Е.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е.А. Гузеев, С.Н. Леонович, К.А. Пирадов. – Брест: БПИ, 1999. – 217 с.

10. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 576 с.
11. Мендельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мендельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
12. Садовский, М.А. О свойстве дискретности горных пород / М.А. Садовский // Физика земли. – 1982. – №12. – 3–18 с.
13. Селяев, В.П. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов / В.П. Селяев, В.И. Соломатов, Л.И. Ошкина. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 152 с.
14. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. – М.: Стройиздат, 1984. – 264 с.
15. Чернышов, Е.М. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов / Е.М. Чернышов, Е.И. Дьяченко, А.И. Макеев. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2012. – 98 с.
16. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов: монография / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – 220 с.
17. Новожилов, В.В. Структурная микромеханика разрушения / В.В. Новожилов // Прикладная математика и механика. – 1969. – Т.33, вып. 2. – С.212–222.
18. Петров, Ю.В. Квантовая аналогия в механике разрушения твердых тел / Ю.В. Петров // Физика твердого тела. – 1996. – Т. 38. – С. 3385–3393.
19. Броек, Д. Основы механики разрушения: пер. с англ. / Д. Броек. – М.: Высш. школа, 1980. – 368 с.
20. Куприяшкина, Л.И. Наполненные цементные композиции / Л.И. Куприяшкина. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 180 с.
21. Остапчук, А.К. Применение теории фракталов в математическом моделировании и технике / А.К. Остапчук, В.Е. Овсянников. – Курган: Курганский гос. ун-т, 2009. – 76 с.

#### References

1. Karpenko, N.I. General models of reinforced concrete mechanics / N.I. Karpenko. – M. Stroyizdat, 1996. – 416 p.
2. Akhverdov, I.N. Theoretical foundations of concrete science / I.N. Akhverdov. – Minsk. Supreme. school, 1991. – 188 p.
3. New about the strength of concrete / A.A. Gvozdev, S.A. Dmitriev, S.M. Krylov [etc.]; ed. Dr. sciences, prof. K.V. Mikhailov. – M: Stroyizdat, 1977. – 272 p.
4. Berg, O.Ya. High strength concrete / O.Ya. Berg, E.N. Shcherbakov, G.N. Pisarenko. – M.: Stroyizdat, 1971. – 208 p.
5. Bondarenko, V.M. Calculation models of force resistance of reinforced concrete: monograph / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. – M.: DIA Publishing House, 2004. – 412 p.
6. Finkel, V.M. Fracture physics: crack growth in solids / V.M. Finkel. – M.: Metallurgy, 1970. – 376 p.
7. Parton, V.V. Mechanics of elastic-plastic fracture / V.V. Parton, E.M. Morozov. – M.: Nauka Publishing House, 1974. – 416 p.
8. German, Ya. Rigidity and strength of steel parts / Ya. German. – M.: Mashinostroenie Publishing House, 1970. – 528 p.
9. Guzeev, E.A. Fracture Mechanics of Concrete: issues of Theory and Practice / E.A. Guzeev, S.N. Leonovich, K.A. Piradov. – Brest BPI, 1999. – 217 p.
10. Timoshenko, S.P. Theory of elasticity / S.P. Timoshenko, J. Goodier. – M.: Nauka Main edition of physical and mathematical literature, 1975. – 576 p.
11. Mendelbrot, B. Fractal geometry of nature / B. Mendelbrot. – M.: Institute of Computer Research, 2002. – 656 p.
12. Sadovsky, M.A. On the property of discreteness of rocks / M.A. Sadovsky // Physics of the earth. – 1982. – N12. – P.3–18.

13. Selyaev, V.P. Chemical resistance of filled cement composites / V.P. Selyaev, V.I. Solomatov, L.I. Oshkina. – Saransk: Publishing House of Mordov. un-ta, 2001. – 152 p.
14. Solomatov, V.I. Chemical resistance of composite building materials / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev. – M.: Stroyizdat, 1984. – 264 p.
15. Chernyshov, E.M. Heterogeneity of structure and resistance to destruction of conglomerate building composites / E.M. Chernyshov, E.I. Dyachenko, A.I. Makeev. – Voronezh: Voronezh GASU, 2012. – 98 p.
16. Selyaev, V.P. Physico-chemical foundations of fracture mechanics of cement composites: monograph / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. – Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2018. – 220 p.
17. Novozhilov, V.V. Structural micromechanics of fracture / V.V. Novozhilov // Applied mathematics and mechanics. – 1969. – Vol.33, issue. 2. – P.212–222.
18. Petrov, Yu.V. Quantum analogy in fracture mechanics of solids / Yu.V. Petrov // Solid state physics. – 1996. – Vol. 38. – P. 3385–3393.
19. Broek, D. Fundamentals of fracture mechanics: trans. from English / D. Broek. – M.: Higher. school, 1980. – 368 p.
20. Kupriyashkina, L.I. Filled cement compositions / L.I. Kupriyashkina. – Saransk, Mordov Publishing House. un-ta, 2007. – 180 p.
21. Ostapchuk, A.K. Application of the theory of fractals in mathematical modeling and technology / A.K. Ostapchuk, V.E. Ovsyannikov. – Kurgan: Kurgan State. un-t, 2009. – 76 p.

УДК 699.887

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_41

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

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

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

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

**Черкасов Дмитрий Васильевич,**  
доцент кафедры «Прикладная механика»  
E-mail: dv-cherkasov@yandex.ru

*Саровский физико-технический институт  
Национальный исследовательский ядерный  
меститут «МИФИ»*

Россия, 607186, г.Саров,  
Нижегородская обл. ул.Духова, д.6

**Шербак Юрий Петрович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры ОТДиЭ  
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

*Вятский государственный университет*  
Россия, 610998, Киров, ул. Московская, д.36

**Юркин Юрий Викторович,**  
кандидат технических наук, зав. кафедрой  
«Строительные конструкции и машины»  
E-mail: yurkinuv@gmail.com

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

Russia, 430005, Saransk, 68,  
Bolshevistskaya St.

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

**Avdonin Valery Viktorovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Applied Mechanics»  
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

**Cherkasov Dmitry Vasilievich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Applied Mechanics»  
E-mail: dv-cherkasov@yandex.ru

*Sarov Institute of Physics and Technology of  
the National Research Nuclear University  
Moscow Engineering Physics Institute*

Russia, 607186, Sarov,  
Nizhny Novgorod region, 6, Dukhova St.

**Shcherbak Yury Petrovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department of OTD&E  
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

*Vyatka State University*  
Russia, 610998, Kirov, , 36, Moskovskaya St.

**Yurkin Yury Viktorovich,**  
Candidate of Sciences, Head of the  
Department «Building Structures and  
Machines»  
E-mail: yurkinuv@gmail.com

## САМОКЛЕЯЩИЕСЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ\*

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

Рассмотрен процесс создания и исследования самоклеящихся радиопоглощающих покрытий. Эти материалы могут быть использованы в качестве покрытий, поглощающих электромагнитные волны в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, уменьшающих мощность отраженного сигнала электромагнитной волны в широком диапазоне частот.

*Ключевые слова: герметик, радиопоглощающий материал, поглощение, отражение*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме «Организация импортозамещающего производства самоклеящихся радиопоглощающих материалов с повышенными защитными свойствами» в рамках Государственного контракта №075-11-2022-008 от 6 апреля 2022 г., идентификатор государственного контракта 000000S407522QMX0002.

**SELF-ADHESIVE RADIO ABSORBING COATINGS\*\***

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

The process of creation and research of self-adhesive radio-absorbing coatings is considered. These materials can be used as coatings which absorb electromagnetic waves in ultrahigh frequency range, reducing the power of the reflected signal of an electromagnetic wave in a wide frequency range.

*Key words: sealant, radio absorbing material, absorption, reflection. radar absorbing coating*

**Введение**

В последнее десятилетие бурное развитие получили технологии, связанные с излучением электромагнитной энергии в окружающую среду. Освоение частотных диапазонов, развитие радиовещания, увеличение числа телевизионных каналов, развитие спутниковой и сотовой связи резко обострили проблемы электромагнитной экологии. Существует устойчивая тенденция наращивания количества излучающих технических средств, увеличения их энергетических потенциалов и территориальной концентрации.

С точки зрения экологии электромагнитное излучение – это один из видов энергетического загрязнения окружающей среды. В 1996 году Всемирная организация здравоохранения впервые ввела понятие «электромагнитное загрязнение окружающей среды», которое ёмко и точно отражает новый формирующийся тренд – именно этот физический фактор сопутствует современному витку технико-экономической политики, основанной на передаче информации. Одновременно материалы Программы ООН по защите окружающей среды (UNEP) и проекта ВОЗ «EMF International Project» подчеркивают, что электромагнитное поле является биологически активным биотропным фактором, в определённых условиях способным вызвать патологические изменения в функционировании организма человека [1–7].

Эффективный способ, позволяющий обеспечить требования электромагнитной экологии и безопасности, – это снижение до приемлемого уровня электромагнитного излучения при работе радиоэлектронных систем за счет применения защитных материалов.

Анализируя состав существующих защитных материалов, можно прийти к выводу, что экранирующие (отражающие) свойства доминируют над поглощающими [8–15]. Это связано с относительной простотой изготовления таких материалов. Однако в условиях современной электромагнитной обстановки потребность именно в поглощающих материалах существенно возрастает, что объясняется необходимостью исключить влияние переотражений на усложнение структуры электромагнитного поля, приводящего, с одной стороны, к возможности формирования локальных неоднородностей, а с другой – к росту суммарного поверхностного облучения объекта.

Таким образом, потребность в использовании материалов и средств снижения интенсивности электромагнитного поля является объективной необходимостью в современных производственных и непроизводственных условиях.

Тенденция развития радиопоглощающих материалов требует создания недорогих материалов, матрицы которых должны обладать высокой адгезией к различным поверхностям, повышенной гидрофобностью.

В связи с этим решением этой проблемы является создание эластичных самоклеящихся радиопоглощающих материалов с высокой адгезией к различным материалам, которые могут крепиться к поверхностям любой сложности.

Для получения самоклеящихся радиопоглощающих материалов предлагается технология получения герметиков невысыхающего типа. Она имеет следующие преимущества:

- технологичность;

\*\* The paper was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic «Organization of import-substituting production of self-adhesive radio-absorbing materials with enhanced protective properties», within the framework of State Contract No. 075-11-2022-008 dated April 6, 2022, identifier of the State Contract 000000S407522QMX0002.

- долговечность (благодаря высокой атмосферно-, термо-, морозо- и химической стойкости);
- экологическая безопасность;
- невысокая стоимость (из-за возможности введения большого количества наполнителей и использования каучуков общего назначения в качестве полимерной основы);
- высокая адгезия к различным субстратам;
- эластичность.

#### Методы и материалы. Волноводная методика проведения экспериментов

Радиофизические свойства материала оценивали по волноводной методике [16]. Она позволяет достаточно быстро проводить эксперименты. Сигнал на выходе генератора автоматически изменялся в пределах нужного диапазона, что позволяло визуально оценивать результаты эксперимента. При этом некоторые опыты ставились с конкретным заданием частоты.

Блок-схема экспериментов по измерению радиопоглощения исследуемых материалов приведена на рис. 1.

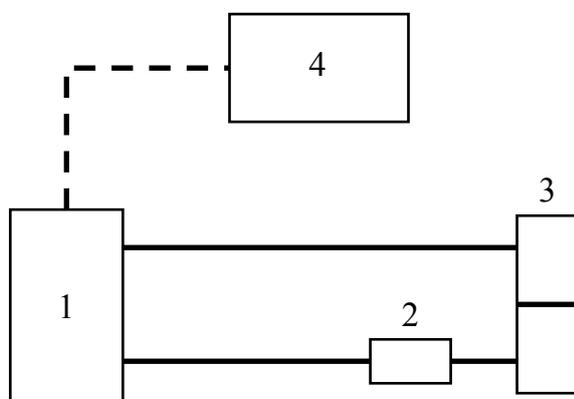


Рис. 1. Блок-схема экспериментов по измерению радиопоглощения исследуемых материалов:

- 1 – скалярный анализатор цепей P2M-04A; 2 – детекторная головка;  
3 – измерительный волноводный тракт с исследуемым материалом;  
4 – персональный компьютер с анализатором спектра Agilent N9000A серии CXA

Скалярный анализатор цепей 1 имеет две детекторные головки 2 для измерения коэффициента прохождения и коэффициента стоячей волны соответственно. Для определения требуемого параметра необходимо подключить к измерительному тракту нужную детекторную головку и штатный кабель прибора согласно схемам, указанным в руководстве по эксплуатации. Измерительный тракт 3 состоит из двух коаксиально-волноводных переходов и двух отрезков волноводов. В ходе эксперимента исследуемый материал размещался в центре на стыке двух отрезков волноводов в виде диафрагмы так, как показано на рис. 2.

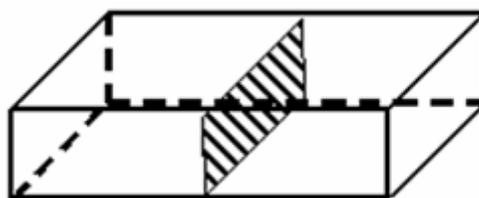


Рис. 2. Размещение исследуемого материала в виде диафрагмы в центре волновода

При проведении измерений величин радиопоглощения материалов использовался скалярный анализатор цепей P2M-04A, который предназначен для измерений модуля коэффициента передачи (КП) и коэффициента отражения (КО) мощности в тракте, а

также для измерения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН). Перед началом измерений к СВЧ-выходу прибора P2M-04A подключался анализатор спектра Agilent N9000A серии CXA для установления и контроля уровня выходной мощности скалярного измерителя цепей во всем доступном диапазоне частот.

Измерение характеристик поглощения материала в регулярных структурах осуществлялось размещением образцов в соответствующих измерительных каналах. В случае прямоугольного волновода канал представлял собой сборку из двух КВП (коаксиально-волноводный преобразователь) и волноводного тракта.

КСВН измерялся в сечении установки исследуемого образца (сечение *A* на рис. 3). Калибровка измерительного тракта в режиме измерения КСВН осуществлялась организацией в сечении *A* режима холостого хода и режима короткого замыкания (в отсутствие исследуемого образца). Режим короткого замыкания реализуется установкой металлической заглушки в указанное сечение *A*. Холостой ход обеспечивается установкой в это сечение согласованной волноводной нагрузки. Измеренная величина КСВН для измерительного тракта без образца во всем интересующем диапазоне частот не превышала 1,3.

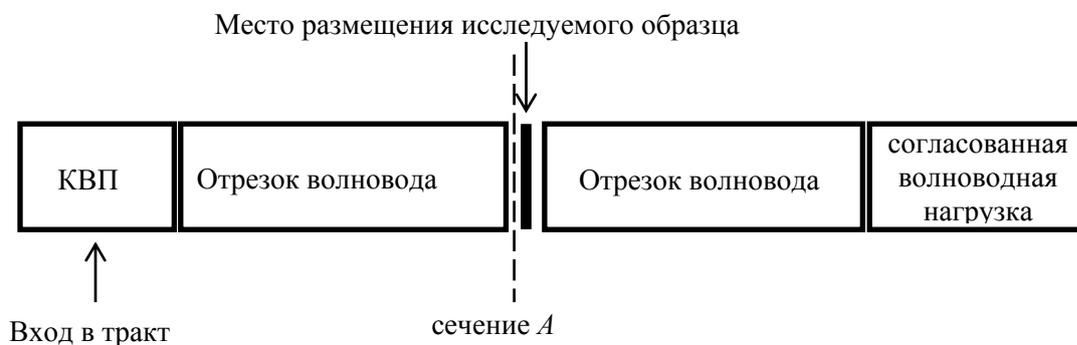


Рис.3. Схема калибровки и измерения КСВН скалярным анализатором P2M-04A

Схема измерения коэффициента прохождения показана на рис. 4. Калибровка прибора P2M-04A в этом режиме осуществлялась подключением измерительной структуры, изображенной на рис. 4, в отсутствие исследуемого образца.

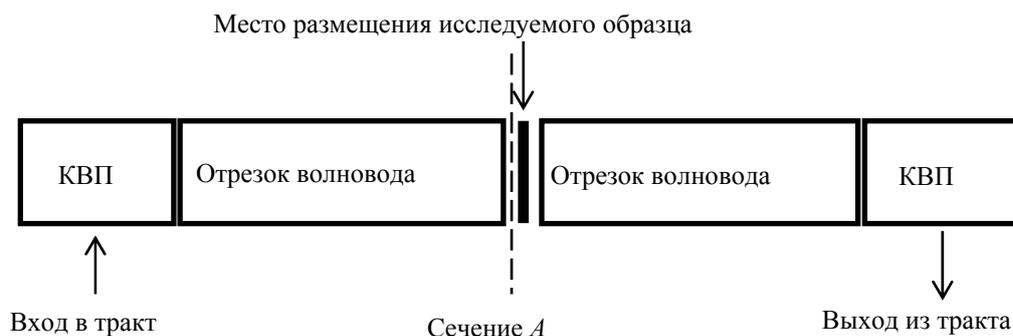


Рис. 4. Схема калибровки и измерения коэффициента прохождения

В результате измерений определяются величины КСВН и коэффициента прохождения при установленном в сечение *A* исследуемом образце. По полученным значениям рассчитывается энергетический баланс (падающая на вход измерительного волноводного тракта мощность есть сумма прошедшей и отраженной волн). Для удобства расчетов и наглядности представления результатов в качестве опорного уровня мощности падающей волны выбрана величина 100 мВт (20 дБм).

### Материалы

За основу для создания радиопоглощающих материалов взяты герметики серии Абрис, ТУ, выпускаемые на заводе ООО «ЗГМ». Эти материалы по своим свойствам

не уступают, а в некоторых случаях превосходят зарубежные аналоги. Для придания им радиопоглощающих свойств в их состав дополнительно вводят специальный наполнитель-поглотитель электромагнитных волн: углеродное волокно UFM-4HD, железо карбонильное радиотехническое марки Р-20.

### Результаты и обсуждение

В качестве связующего для герметиков невясыхающего типа использовали бутылкаучук и этиленпропилендиеновый каучук. Результаты исследования радиофизических свойств этих полимеров приведены на рис. 5–10.

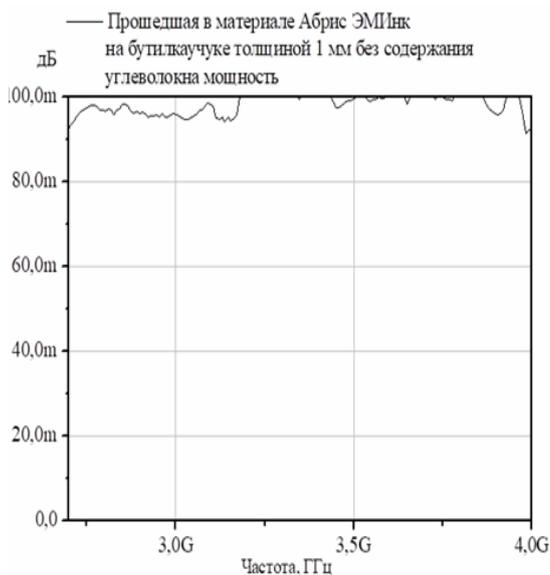


Рис. 5. Прохождение сигнала через полимер.  
Уровень сигнала, мВт

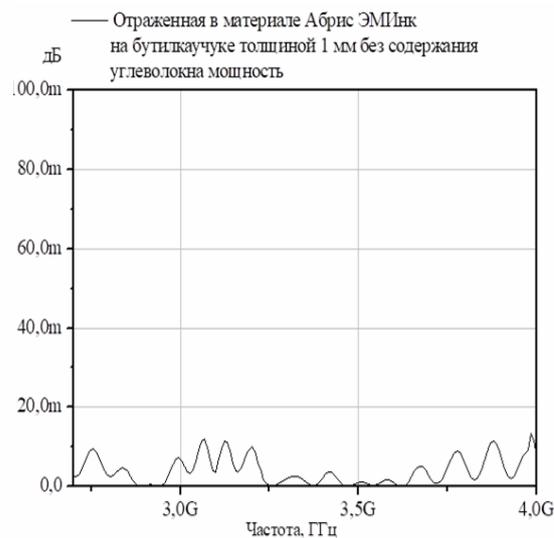


Рис. 6. Отражение сигнала, мВт

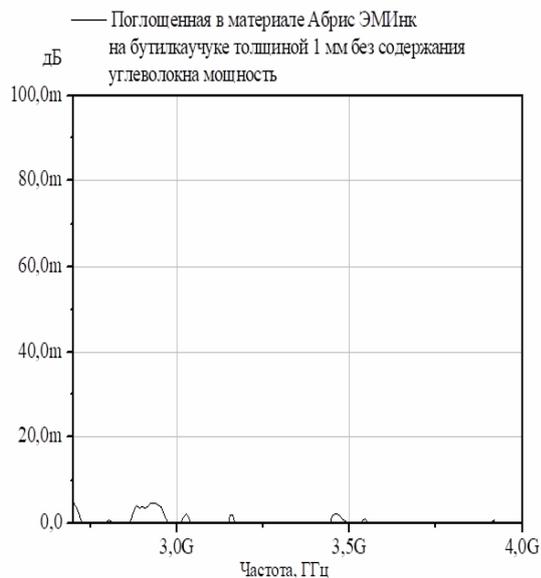


Рис. 7. Поглощение сигнала, мВт

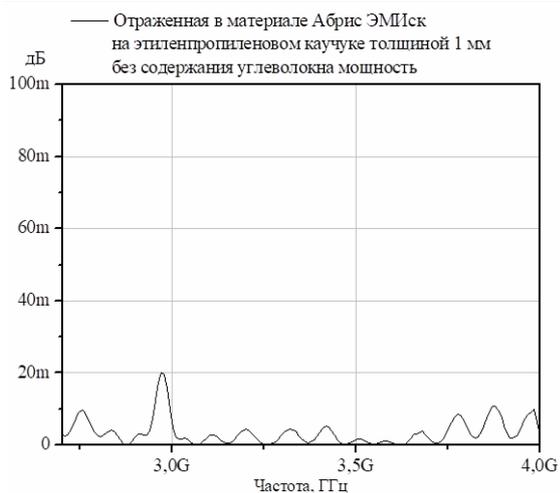


Рис. 8. Прохождение сигнала, мВт

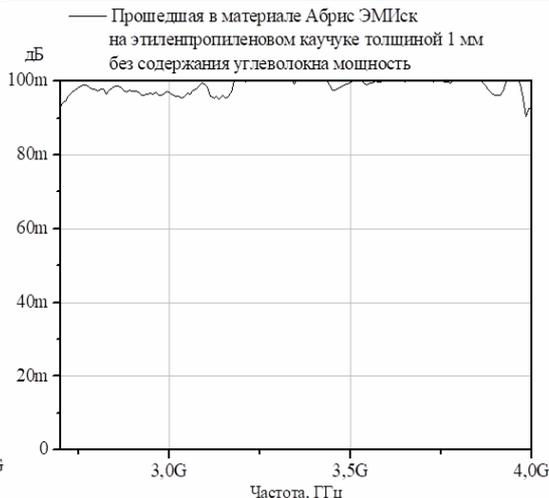


Рис. 9. Отражение сигнала, мВт

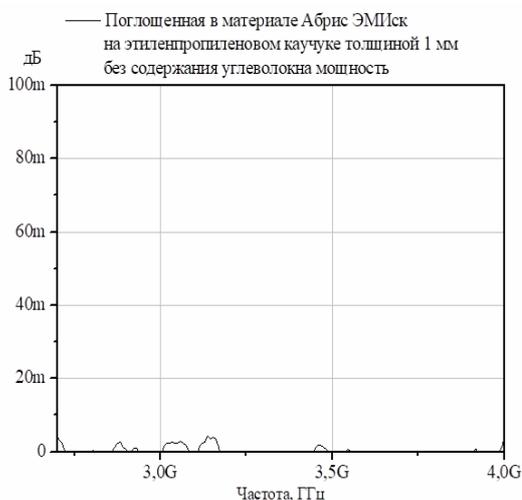


Рис. 10. Поглощение сигнала, мВт

Проведенные исследования показали, что бутилкаучук и этиленпропиленовые каучуки практически не отражают и не поглощают сигнал. Из этого следует, что полимерная основа не влияет на радиопоглощающие свойства. Поэтому для изготовления радиопоглощающих материалов рекомендуется оба полимера. Этиленпропиленовый каучук рекомендуется использовать при изготовлении материалов, к которым предъявляются повышенные требования по атмосферостойкости, УФ-облучению и озонному облучению.

В качестве поглотителей электромагнитных волн приняли углеродное волокно двух типов – молотое и рубленое – и карбонильное железо Р-20. Результаты исследования влияния этих поглотителей на радиофизические свойства материала приведены на рис. 11–20.

Проведенные исследования показали, что поглощение электромагнитной волны при содержании карбонильного железа 10–40 % составляет не более 20 %. Наибольшими поглощающими свойствами обладают материалы, наполненные рубленым углеродным волокном. При содержании рубленого углеродного волокна 5–10 % поглощение достигает 50–60 %. В связи с этим исследовано влияние количества углеродного волокна на радиофизическое свойство материала (см. таблицу). Проведенные исследования показали, что максимальное ослабление излучения наблюдается при содержании углеродного волокна в количестве 5 %.

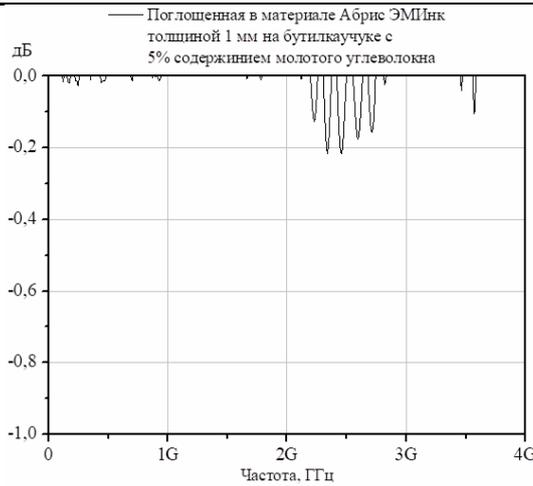


Рис. 11. Материал Абрис ЭМИнк на бутилкаучуке толщиной 1 мм с 5 %-м содержанием молотого углеволокна

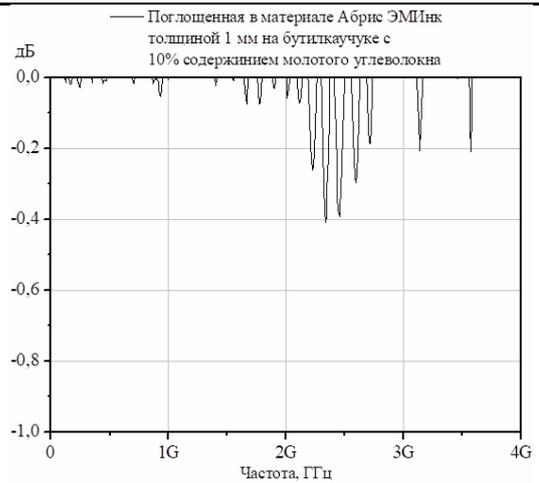


Рис. 12. Материал Абрис ЭМИнк на бутилкаучуке толщиной 1 мм с 10 %-м содержанием молотого углеволокна

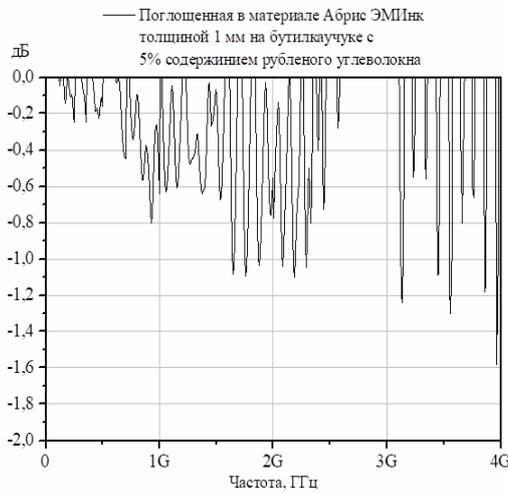


Рис. 13. Материал Абрис ЭМИнк на бутилкаучуке толщиной 1 мм с 5 %-м содержанием рубленого углеволокна

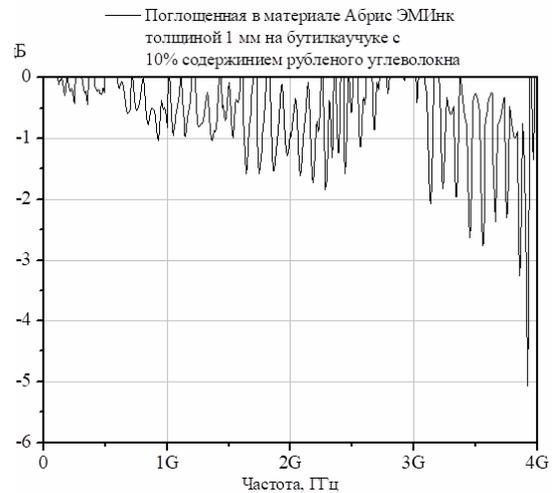


Рис. 14. Материал Абрис ЭМИнк на бутилкаучуке толщиной 1 мм с 10 %-м содержанием рубленого углеволокна

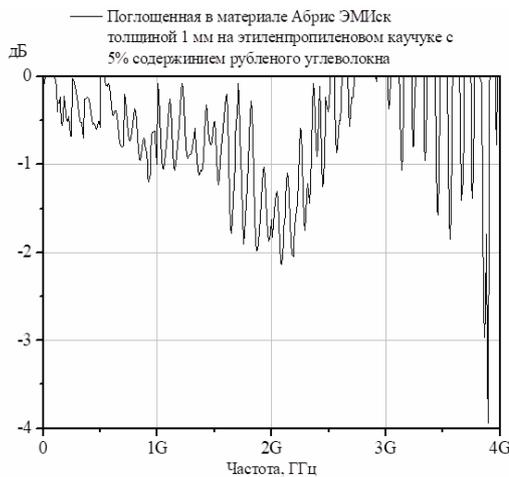


Рис. 15. Материал Абрис ЭМИск на этиленпропиленовом каучуке толщиной 1 мм с 5 %-м содержанием рубленого углеволокна

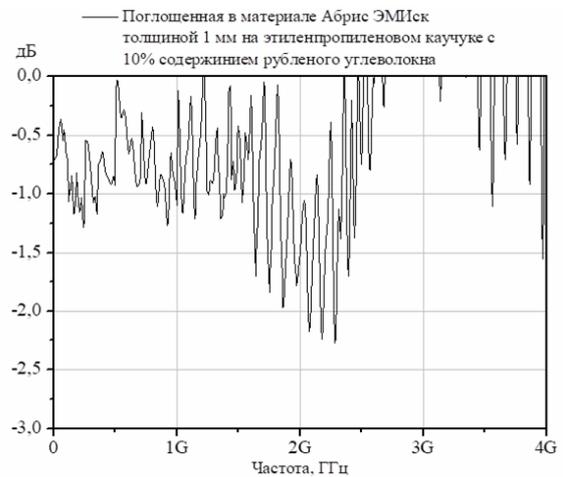


Рис. 16. Материал Абрис ЭМИск на этиленпропиленовом каучуке толщиной 1 мм с 10 %-м содержанием рубленого углеволокна

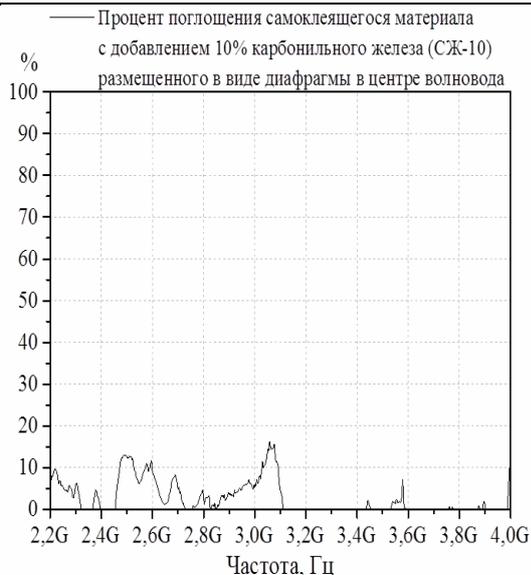


Рис. 17. Анализ процесса поглощения самоклеящегося материала с добавкой СЖ-10, мВт

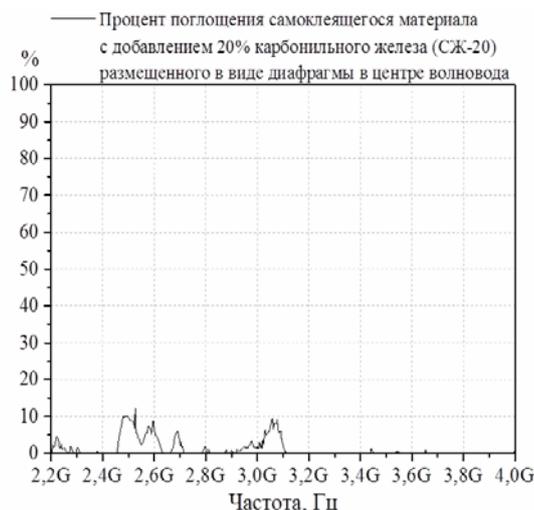


Рис. 18. Анализ процесса поглощения самоклеящегося материала с добавкой СЖ-20, мВт



Рис. 19. Анализ процесса поглощения самоклеящегося материала с добавкой СЖ-30, мВт



Рис. 20. Анализ процесса поглощения самоклеящегося материала с добавкой СЖ-40, мВт

Влияние количества углеродного волокна на ослабление излучения

№ п/п	Содержание углеродного волокна, %	Ослабление излучения, дБ
1	3	0,54
2	5	12,4
3	10	10
4	20	2,2

**Выводы**

1. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что на основе герметиков невысыхающего типа можно изготавливать самоклеящиеся радиопоглощающие материалы.

2. Показано, что на основании герметиков невысыхающего типа можно получать тонколистовые материалы с коэффициентом поглощения более 50 %.

3. В перспективе и тонколистовых материалов будут собираться многослойные высокоэффективные радиопоглощающие материалы.

### Список литературы

1. Данилевский, В.Я. О раздражении нервов электрическими лучами / В.Я. Данилевский // Вестник медицины. – 1897. – Т.11, №4. – С.69–71.
2. Лукьянова, С.Н. Электромагнитное поле СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для центральной нервной системы / С.Н. Лукьянова. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2015. – 200 с.
3. Григорьев, Ю.Г. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности / Ю.Г. Григорьев, О.А. Григорьев. – М.: Экономика, 2016. – 574 с.
4. Hardell, L. Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards / L. Hardell, C. Sage // *Biomed Pharmacother.* – 2008. – № 62(2). – P. 104–109. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2007.12.004>.
5. Григорьев, О.А. Радиобиологическая оценка воздействия электромагнитного поля подвижной сотовой связи на здоровье населения и управление рисками: дис. ... доктора биологических наук: 03.01.01 / О.А. Григорьев; [Федер. мед. биофиз. центр им. А.И. Бурназяна]. – М., 2012. – 397 с.
6. Григорьев, О.А. Проблемы электромагнитного загрязнения окружающей среды / О.А. Григорьев, Ю.Б. Зубарев, А.С. Прокофьева // *Качество и жизнь.* – 2017. – № 2 (14). – С. 17–24.
7. Рубцова, Н.Б. Прогностическая модель биологической оценки эквивалентных уровней воздействий электромагнитных полей радиочастотного диапазона / Н.Б. Рубцова, С.Ю. Перов, О.В. Белая // *Медицина труда и промышленная экология.* – 2018. – №12. – С.4–8. – URL: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-12-4-8>
8. Ковнеристый, Ю.К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ю.К. Ковнеристый, И.Ю. Лазарева, А.А. Раваев. – М.: Наука, 1982. – 164 с.
9. Михайловский, Л.К. Радиопоглощающие бестоковые среды, материалы и покрытия (электромагнитные свойства и практические применения) / Л.К. Михайловский // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.* – 2000. – №9. – С.21–30.
10. Богуш, В.А. Композитные металлсодержащие волокнистые материалы для гибких экранов электромагнитного излучения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06 / В.А. Богуш; науч. рук. Л.М. Лыньков. – Мн.: БГУИР, 2000. – 20 с.
11. Криваткин, А.М. Специальные пластмассы для экранирования электромагнитных излучений / А.М. Криваткин, Ю.Т. Сакуненко // *Полимерные и композиционные материалы: технологии, оборудование, применение: тез. докл. науч.-практ. конф. 7-й междунар. специализир. выставки «Индустрия пластмасс – 2006»*, Москва, 14 марта 2006 г. – М.: Максима, 2006. – С.28–30.
12. Казанцева, Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // *Радиотехника и электроника.* – 2003. – Т. 48, №2. – С. 196–209.
13. Луцев, Л.В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение / Л.В. Луцев, Г.А. Николайчук, В.В. Петров, С.В. Яковлев // *Нанотехника.* – 2008. – №2(14). – С. 37–43.
14. Николайчук, Г. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур / Г. Николайчук, В. Иванов, С. Яковлев // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2010. – №1 (99). – С. 92–95.
15. Никитина, В.Н. Радиоэкранирующие свойства магнезиально-шунгитовых строительных материалов / В.Н. Никитина, Г.Г. Ляшко, Л.Н. Поцелуева // В сб. трудов «Ежегодник Рос. Нац. Комитета по защите от неионизирующих излучений», 2004–2005. – М.: Изд-во АЛЛАНА, 2006. – С.109–113.
16. Xuegong, Huang Microwave Absorption Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes / Carbonyl Iron Particles / Polyurethane Foams / Xuegong Huang, Danping Yu.,

## References

1. Danilevsky, V.Ya. On stimulation of nerves by electric rays / V.Ya. Danilevsky // *Bulletin of medicine*. – 1897. – Vol.11. – No. 4. – P. 69–71.
2. Lukyanova, S.N. The electromagnetic field of the microwave range of non-thermal intensity as an irritant for the central nervous system / S.N. Lukyanova. – M.: FGBU SSC FMBTs im. A.I. Burnazyan FMBA of Russia, 2015. – 200 p.
3. Grigoriev, Yu.G. Cellular communication and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, danger forecast / Yu. G. Grigoriev, O.A. Grigoriev. – M.: Economics, 2016. – 574 p.
4. Hardell, L. Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards / L. Hardell, C. Sage // *Biomed Pharmacother*. – 2008. – № 62(2). – P. 104–109. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2007.12.004>.
5. Grigoriev, O.A. Radiobiological assessment of the impact of the electromagnetic field of mobile cellular communication on public health and risk management: dis. ... doctors of biological sciences: 03.01.01 / O.A. Grigoriev; [Feder. honey. biophys. center them. A.I. Burnazyan]. – M., 2012. – 397 p.
6. Grigoriev, O.A. Problems of electromagnetic pollution of the environment / O.A. Grigoriev, Yu.B. Zubarev, A.S. Prokofieva // *Quality and life*. – 2017. – No. 2 (14). – P. 17–24.
7. Rubtsova, N.B. Prognostic model of biological assessment of equivalent levels of exposure to electromagnetic fields of the radio frequency range / N.B. Rubtsova, S.Yu. Perov, O.V. Belaya // *Occupational medicine and industrial ecology*. – 2018. – No. 12. – P.4–8. – URL:<https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-12-4-8>
8. Kovneristy, Yu.K. Materials absorbing microwave radiation / Yu.K. Kovneristy, I.Yu. Lazareva, A.A. Ravaev. – M.: Nauka, 1982. – 164 p.
9. Mikhailovsky, L.K. Radio-absorbing currentless media, materials and coatings (electromagnetic properties and practical applications) / L. K. Mikhailovsky // *Foreign radio electronics. Advances in modern radio electronics*. – 2000. – No. 9. – P. 21–30.
10. Bogush, V.A. Composite metal-containing fibrous materials for flexible screens of electromagnetic radiation: author. dis. ... candidate of sciences: 05.27.06 / V.A. Bogush; Scientific head the L. M. LYNKOV. – Minsk: BSUIR, 2000. – 20 p.
11. Krivatkin, A.M. Special plastics for shielding electromagnetic radiation / A. M. Krivatkin, Yu. T. Sakunenko // *Polymer and composite materials: technologies, equipment, application: abstract. report scientific-practical. conf. 7 intl. specialized exhibition «Plastics Industry – 2006»*, Moscow, March 14, 2006. – M.: Maxima, 2006. – P.28–30.
12. Kazantseva, N.E. Prospective materials for absorbers of microwave electromagnetic waves / N.E. Kazantseva, N.G. Ryvkina, I.A. Chmutin // *Radiotekhnika i elektronika*. – 2003. – Vol. 48. – No. 2. – P. 196–209.
13. Lutsev, L.V. Multi-purpose radio absorbing materials based on magnetic nanostructures: production, properties and application / L.V. Lutsev, G.A. Nikolaychuk, V.V. Petrov, S.V. Yakovlev // *Nanotechnology*. – 2008. – No. 2 (14). – P. 37–43.
14. Nikolaychuk, G. Radar absorbing materials based on nanostructures / G. Nikolaychuk, V. Ivanov, S. Yakovlev // *Electronics: science, technology, business*. – 2010. – No. 1 (99). – P. 92–95.
15. Nikitina, V.N Radio-shielding properties of magnesia-shungite building materials / V.N Nikitina, G.G. Lyashko, L.N. Potselueva // *In the Proceedings of the Yearbook of the Ros. Nats. Committee for Protection from Non-Ionizing Radiation, 2004–2005*. – M.: ALLAN Publishing House, 2006. – P. 109–113.
16. Xuegong, Huang Microwave Absorption Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes /Carbonyl Iron Particles /Polyurethane Foams / Xuegong Huang, Danping Yu., Simin Wang // *Materials*. – 2022. – №15(16). – 5690. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma15165690>.

УДК 69: 519.7

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_51

Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет  
Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я  
Красноармейская ул., д. 4

**Королев Евгений Валерьевич,**  
проректор по научной работе, доктор  
технических наук, профессор, советник  
РААСН  
E-mail: prorector.umn@spbgasu.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

Saint Petersburg State University of  
Architecture and Civil Engineering

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

**Korolev Evgeny Valerievich,**  
Vice-rector for scientific work, doctor of  
science in engineering, professor, adviser of  
the Russian academy of architectural and  
building science  
E-mail: prorector.umn@spbgasu.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

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК СИСТЕМ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Е.В. Королев, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

На основе общих принципов системного анализа предлагаются методологические принципы синтеза материалов.

Композиты представляются как сложные слабоструктурированные системы с возможностью выбора альтернативных компонентов. Рассматривается хемометрический подход к управлению качеством материалов. Производится анализ композиционных материалов с позиций теории систем. Даются методы математического моделирования структуры и свойств материалов нового поколения и модель деструкции композиционных материалов. Приводятся примеры реализаций.

*Ключевые слова:* композиты, сложные системы, синтез, состояние и перспективы, методологические принципы

## METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIALS AS SYSTEMS: STATUS AND OUTLOOK

E.V. Korolev, I.A. Garkina, A.M. Danilov

Based on the general principles of system analysis, methodological principles for the synthesis of materials are proposed.

Composites are presented as complex semi-structured systems with a choice of alternative components. A chemometric approach to material quality control is considered. Composite materials are analyzed from the standpoint of systems theory. Approbation of approaches to the creation of materials for protection against ionizing radiation has been carried out. Methods for mathematical

modeling of the structure and properties of new generation materials and a model for the destruction of composite materials are given. Implementation examples are given.

*Keywords: composites, complex systems, synthesis, state and prospects, methodological principles*

**Композиты как сложные слабоструктурированные системы: выбор альтернативных компонентов.** Одним из способов исследования сложных слабоструктурированных систем со множеством противоречивых целей и критериев является когнитивное моделирование (Э. Толмен, 1948). Основой когнитивного моделирования служит когнитивная карта (ориентированный граф), позволяющая формализовать взаимодействие при функционировании системы основных связей (может использоваться неполная, нечеткая и даже противоречивая информация). Когнитивная карта отражает субъективные представления о функционировании и развитии системы. Ее построение с использованием иерархической структуры критериев качества, а также иерархической структуры собственно системы (если это возможно) позволяет в дальнейшем рассматривать систему уже как структурированную. Участие человека при формализации первичных представлений субъектно-формальными методами не позволяет гарантировать достоверность полученных решений (например, риск неадекватного применения формализованной модели к конкретной проблемной ситуации вследствие недопонимания математического смысла конструкций специалистами проблемной области). Сложность системы требует ее междисциплинарных исследований и привлечения при построении когнитивной карты специалистов, компетентных в различных узкопредметных областях знаний; формализации первичных представлений о слабоструктурированной проблеме в виде коллективной когнитивной карты (для обобщения и согласования разных представлений). Решение этой задачи в известной мере возможно с использованием методов концептуальной структуризации, критериев и частных технологий формирования и согласования коллективных понятий. Целевое состояние системы считается достигнутым, если оценка целенаправленного развития системы, заданная в виде функционала достижения целей, практически не изменяется. Приведенный подход успешно использовался при синтезе радиационно-защитного композита как сложной системы, его идентификации, формировании и формализации целей, множества альтернатив для их достижения и, наконец, многокритериальной оптимизации [1...5].

**Хемометрический подход в управлении качеством материалов.** Основан на применении проекционных математических методов, позволяющих выделять в больших массивах данных латентные переменные и анализировать связи в изучаемой системе. К сожалению, несмотря на простоту и эффективность такого (часто визуального) подхода к анализу экспериментальных данных, он практически не используется в строительном материаловедении. Нами с использованием метода Principal Component Analysis производилось ранжирование критериев качества  $q_i, i = \overline{1, p}$  по полученным их значениям для  $n$  экспериментальных образцов. Первая главная компонента определялась как направление наибольшего изменения (разброса вдоль некоторой центральной оси – новой переменной) данных  $\mathbf{q} = \left\| q_{ij} \right\|, i = \overline{1, p}, j = \overline{1, n}$  в декартовой системе координат  $Oq_1q_2\dots q_p$  (приближенно – чисто геометрически; уточнение – на основе наилучшей линейной аппроксимации всех исходных точек  $q_{ij}$  методом наименьших квадратов). Вторая главная компонента принималась (по определению!) ортогональной направлению первой (вдоль нее происходит следующее по величине изменение значений  $q_{ij}$ ), а третья компонента – перпендикулярной как первой, так и второй (лежит в направлении, в котором происходит третье по величине изменение данных). Аналогично определялись последующие главные направления. Полученная система главных компонент дает совокупность ортогональных осей, каждая из которых лежит в направлении максимального изменения данных в порядке

убывания этих величин. В силу ортогональности главных компонент в полученном новом наборе переменные (линейные комбинации исходных переменных) уже не коррелируют друг с другом. Переход от исходной декартовой системы координат к новому набору ортогональных осей позволяет избавиться от зависимости между критериями. Верхний предел числа главных компонент не превышает  $\max\{n-1, p\}$ .

Эффективная размерность пространства главных компонент определяется рангом матрицы  $\mathbf{q} = \|q_{ij}\|$ . Последняя главная компонента лежит в направлении, в котором разница между образцами будет минимальной (фактически различие образцов здесь невозможно, так как все эти отличия есть лишь случайный шум). Главные компоненты с большими номерами рассматривались как направления, в которых основная составляющая является шумом. Это позволило осуществить декомпозицию исходной матрицы данных на структурную часть (несколько главных первых компонент, лежащих в направлениях максимальных изменений) и на шум (направления, в которых разница между положением точек мала и ей можно пренебречь).

Каждое из свойств (критериев качества) является интегральной характеристикой материала, зависящей от свойств компонентов, состава, условий приготовления, твердения и т.д. При этом оценка качества композита производится по совокупности как зависимых, так и противоречивых критериев (химическая стойкость, морозо-, термостойкость, сопротивление удару и истиранию, радиационный разогрев, адгезионные свойства, защитные свойства по отношению к стальной арматуре и др.). Выделялась совокупность линейных комбинаций исходных критериев (практически независимых), что в последующем с использованием методов планирования эксперимента и многокритериальной оптимизации позволило разработать материалы специального назначения.

**Композиционные материалы с позиций теории систем.** К сожалению, ни одна версия системного подхода (целеустремленные системы – Р. Акофф, функциональные системы – П.К. Анохин, системы гомеостатического типа – Ю.Н. Горский, системы как триада «вещь – свойство – отношение» – А.И. Уемов, общая теория систем – Ю.А. Урманцев) по стандартам научности XXI века не получила развития до ранга теории. Это относится и к системным исследованиям в области синтеза композиционных материалов. Есть только отдельные опыты применения системной методологии. Налицо потребность и демонстрация возможностей разработок в области синтеза систем.

Основной проблемой при синтезе является усиливающаяся фрагментация знания. Требуется аппарат синтеза, основанный на интеграции междисциплинарных категорий, с его развитием до уровня математической теории, в основе которой лежит идеальный объект, заданный в системе аксиом и способный выходить на уровень приложений в разных областях. При синтезе производится установление взаимосвязи состава, технологии производства, а также структуры и свойств материала. Композиционный материал рассматривается как сложная система, состоящая из элементов различного уровня детализации: от атомного до отдельного процесса. Так как сущность системы нельзя понять, рассматривая только свойства элементов, то изучаются как способы взаимодействия элементов, так и взаимодействие элементов и системы с окружающей средой. В частности, анализ отдельных стадий процесса без выявления взаимосвязи между ними и с окружающей средой не дает возможности судить обо всем технологическом процессе. Так, массоперенос вещества осуществляется на нескольких технологических переделах: при химической реакции взаимодействия вяжущего с активатором; при перемешивании компонентов; тепловой обработке и др. При создании радиационно-защитных композиционных материалов на основе анализа технологического процесса выделялись несколько уровней иерархии с отношениями подчиненности. Исходя из иерархической структуры критериев качества, строилась иерархическая структура композита [6, 7]. Проводилось последовательное решение ряда задач: структурная и параметрическая идентификация, разработка функционалов качества, определение интегративных свойств систем с использованием автономных

исследований сепаратных подсистем, введение настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам, многокритериальный синтез, определение рецептурно-технологических параметров [8...10]. По существу, разработка методологических принципов синтеза композиционных материалов напрямую связана с разработкой указанных иерархических структур.

**Апробация при создании материалов для защиты от ионизирующих излучений.** На примере радиационно-защитного бетона рассматривался качественный анализ материалов как систем на основе построения когнитивной карты с указанием причинно-следственных связей. Указанный подход в связи с междисциплинарностью системных исследований в материаловедении практически не используется («...когда внешней средой наука не востребована, то по этому свойству система изолирована или закрыта, и только тогда, когда появится потребитель во внешней среде, система откроется»).

Понятие «структура» в материаловедении носит расплывчатый характер (возникают трудности классификации и установления параметров оптимальной структуры композита). При классификации структуры бетона с учетом его плотности рассматриваются четыре основных типа [11, 12]: плотная, с пористым заполнителем, ячеистая и зернистая; при масштабной классификации выделяются макро- и микро-структура; в некоторых случаях – пять масштабных уровней (субмикроскопический (атомно-молекулярный,  $< 10^{-7}$  см), микроскопический (коллоидно-дисперсный,  $10^{-7} \dots 10^{-5}$  см), мезоскопический (пылевидные фракции,  $10^{-5} \dots 0,014$  см), макроскопический (песчаная фракция,  $0,014 \dots 0,5$  см), мегаскопический (гравийно-щебенчатая фракция,  $> 0,5$  см)). Управление технологией изготовления производилось по В.И. Соломатову с возможностью раздельного формирования отдельных структур уникальных композитов на мало- или несовмещающихся компонентах.

Оптимизация каждого структурного уровня осуществлялась на основе выделенных критериев (управление свойствами субмикроструктуры – на атомарном или молекулярном уровне; для композитов на основе вяжущих веществ, не содержащих дисперсных фаз, выделялся уровень микроструктуры; для каркасных бетонов дополнительно рассматривался уровень каркаса, а также мезоструктура (пропиточная композиция) и макроуровень (бетон); [4]). На каждом последующем структурном уровне (новый материал) оптимизированные рецептура и технология предыдущего уровня уточнялись. Последовательное совмещение уровней (от микро- до макроструктуры) осуществлялось на основе критериев (свойств), обеспечивающих получение качественного композиционного материала на уровне макроструктуры (продукта технологии). Определение оптимальной структуры композитов осуществлялось по И.А. Рыбьеву (оптимальной структуре (организации) в зависимости от соотношения в материале скрепляющей фазы и заполнителя (фазовое отношение) соответствует комплекс экстремальных значений свойств (закон «створа»)). Показана возможность выделения для радиационно-защитных композитов различных уровней и типов взаимосвязей между ними с последовательным включением систем более низкого уровня в системы более высокого уровня (строение системы – структурированное, иерархическое). Широко использовалась аналогия структур систем: изоморфизм и гомоморфизм. Для качественного анализа рассматриваемых композитов как систем строился знаковый взвешенный ориентированный граф (в силу громоздкости здесь не приводится). Построение оргграфа позволило установить элементарные рецептурные факторы (количество, удельная поверхность, химический состав и др.) для управления технологией изготовления материала.

**Математическое моделирование структуры и свойств материалов нового поколения.** Материалы представлялись как системы, что позволило в полной мере использовать системный подход при решении задач синтеза. Рассматривались проблемы идентификации и управления, вопросы использования информационно-вычислительной среды, в том числе концептуальные аспекты моделирования. При решении задач идентификации исходя из применения определенного математического аппарата от степени его разработанности осуществлялся предварительный анализ

априорной информации. Основные усилия направлялись на структуризацию и абсолютную формализацию. При разработке и управлении качеством строительных материалов с регулируемой структурой и свойствами использовались методы векторной оптимизации (лексикографическая задача; метод последовательных уступок; скаляризация критериев качества на основе линейной свертки и введения контрольных показателей; построение множеств Парето и др.). Целевая функция определялась по желаемым видам кинетических процессов формирования основных физико-механических характеристик композитов на основе решения сначала общей, а затем частной задач идентификации [13]. При выборе целевой функции учитывалась возможность установления связи между строением композита и изменениями макро-скопических характеристик. С учетом сложности установления влияния рецептурно-технологических параметров на характеристики материалов разработана специальная методика управления выходными характеристиками материала, определялись перекрестные связи (синергетика) между свойствами материала; уточнялись математические модели подсистем с последующей идентификацией параметров (для отдельных систем – из условий получения экстремумов целевых функций). Оказалось эффективным использование принципа и диаграмм Парето (начальные 20 % определяют последующие 80 % времени выхода контролируемого параметра на эксплуатационное значение): облегчается разработка рецептуры с выделением элементов, определяющих, в основном, эксплуатационные характеристики материала. Так, для эпоксидных композиционных материалов для защиты от радиации прочность и плотность, в основном, определяются степенью наполнения и видом модификатора. Использовался итеративный способ улучшения качества материала на основе последовательного построения на каждом этапе соответствующих диаграмм Парето. Методологические принципы синтеза материалов, используемые методы идентификации неоднократно отмечались в качестве прототипа нового метода идентификации.

**Модель деструкции композиционных материалов.** В общей теории искусственных композиционных конгломератов под долговечностью понимается способность материала сохранять на допустимом уровне достаточно продолжительное время структурные параметры, хотя оценка долговечности материалов по изменению его свойств и не является безупречной. Срок службы материала делят на три последовательных этапа: упрочнение структуры и улучшение свойств КМ; интервал относительной стабильности показателей; деструкция материала. Под структурой понимается совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность (сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях). На основе длительного опыта разработки композиционных материалов специального назначения в модели деструкции композиционных материалов учитывались  $N_s$  связи, характеризующие общий уровень внутренних напряжений, а также  $N_b$  разорванные связи. Снижение величины внутренних напряжений приводит к улучшению свойств материала, а увеличение числа разорванных связей – к снижению показателей качества. Баланс между количеством напряженных и разорванных связей и определяет этапы процесса деструкции материала. Разрыв напряженных связей способствует не только снижению внутренних напряжений, но и появлению новых напряженных связей вследствие перераспределения внешней нагрузки. Предполагалось, скорость роста  $N_b$  увеличивается пропорционально  $N_s$ , а скорость роста  $N_s$  уменьшается пропорционально  $N_b$ . Совместное изменение  $N_s$  и  $N_b$  определяли как решение задачи Коши

$$\frac{dN_b}{dt} = \alpha N_b N_s, \quad \frac{dN_s}{dt} = (\beta - \alpha N_b) N_s; \quad N_b(0) = N_{b0}, \quad N_s(0) = N_{s0},$$

где  $\alpha, \beta$  – энергетические константы.

Рассматриваемая система уравнений по форме совпадает с уравнениями Лотки – Вольтерра (здесь в правой части первого уравнения системы содержится дополнительное постоянное слагаемое). Параметрическая идентификация модели осуще-

ствлялась исходя из экспериментальных значений прочности  $R(t)$  на сжатие. Прямой физический смысл имеют лишь восходящие участки  $N_b(t)$ : жирный пунктир на рис. 1. Наблюдалось повышение показателей качества материала в начальный период эксплуатации; дальнейшее накопление  $N_b$  приводит к постепенному снижению качества материала (рис. 2).

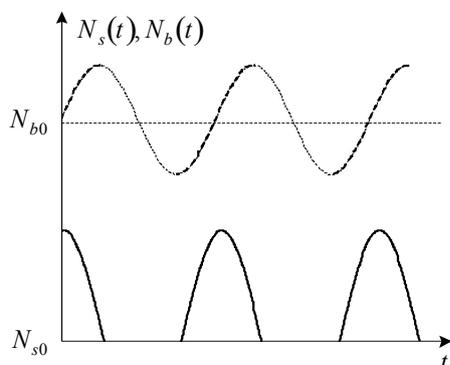


Рис. 1

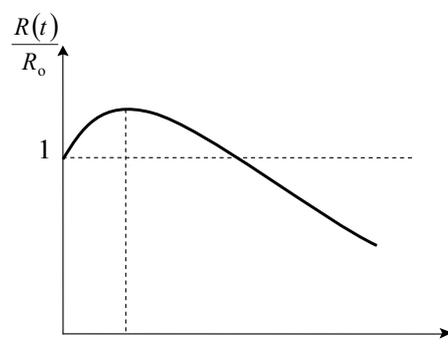


Рис. 2

Эффективность использования модели подтвердилась при разработке серных сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации [14].

### Выводы

На основе опыта разработки сложных систем предлагаются методологические принципы синтеза композиционных материалов: композиты как сложные слабо-структурированные системы, выбор альтернативных компонентов; хеометрический подход к управлению качеством материалов; анализ композиционных материалов с позиций теории систем.

Подходы прошли апробацию при создании ряда материалов. Представлены методы математического моделирования структуры и свойств материалов нового поколения и модель деструкции композиционных материалов. Приводятся примеры реализаций.

### Список литературы

1. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.
2. Чернышов, Е.М. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Часть 3. Системная идентификация «конструкции структуры» конгломератных строительных композитов (в качественной постановке проблемы) / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 3 (747). – С. 5–26.
3. Гусев, Б.Н. Материаловедение: традиции, достижения, перспективы / Б.Н. Гусев, А.Ю. Матрохин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 4 (376). – С. 31–36.
4. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: Библиотека научных разработок и проектов МГСУ, 2012. – 432 с.
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. Будылина, Е.А. Принципы системности и декомпозиции при разработке композитов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 3 (40). – С. 44–49.
7. Будылина, Е.А. Рациональная идентификация сложных систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1 (50). – С. 23–27.
8. Будылина, Е.А. Системное проектирование композитов: моделирование, синтез, управление / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1 (50). – С. 37–43.
9. 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.
10. Бормотов, А.Н. Разработка и обоснование функционала качества при многокритериальном синтезе композитов специального назначения / А.Н. Бормотов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10-1. – С. 20–25.
11. Смирнов, В.А. Стохастическое моделирование наноразмерных систем / В.А. Смирнов, Е.В. Королев, С.С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 6–14.
12. Смирнов, В.А. Моделирование и инструментальные средства численного анализа в нанотехнологии материаловедения: обзор / В.А. Смирнов, Е.В. Королев, А.В. Евстигнеев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2014. – Т. 6, № 5. – С. 34–58.
13. Гарькина, И.А. Формализация оценки структуры и свойств композиционных материалов специального назначения / И.А. Гарькина // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С. 70–72.
14. Альбакасов, А.И. Системное проектирование серных композиционных материалов / А.И. Альбакасов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 2. – С. 18–27.

#### References

1. Chernyshov, E.M. The problem of the complexity and consistency of a qualitative description and statistical reliability of a quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: theory and practice. – 2022. – No. 2 (17). – P. 75–80.
2. Chernyshov, E.M. Material science and technology of building composites as a system of scientific knowledge and subject of research development. Part 3. System identification of the «structure design» of conglomerate building composites (in a qualitative formulation of the problem) / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Izvestiya vysshikh uchebnykh obuchenii. Construction. – 2021. – No. 3 (747). – P. 5–26.
3. Gusev, B.N. Material science: traditions, achievements, prospects / News of higher educational institutions / B.N. Gusev, A.Yu. Matrokhin // Technology of the textile industry. – 2018. – No. 4 (376). – P. 31–36.
4. Bazhenov, Yu.M. System analysis in building materials science / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: Library of scientific developments and projects of MGSU, 2012. – 432 p.
5. Garkina, I.A. The 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. – No. 1–2. – P. 60–62.
6. Budylyna, E.A. Principles of consistency and decomposition in the development of composites / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 3 (40). – P. 44–49.
7. Budylyna, E.A. Rational identification of complex systems / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1 (50). – P. 23–27.

8. Budylna, E.A. System design of composites: modeling, synthesis, control / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1 (50). – P. 37–43.
9. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenstadt // Construction materials. – 2020. – No. 9. – P. 54–61
10. Bormotov, A.N. Development and substantiation of the quality functional in the multicriteria synthesis of special-purpose composites / A.N. Bormotov // Fundamental research. – 2016. – No. 10–1. – P. 20–25.
11. Smirnov, V.A. Stochastic modeling of nanoscale systems / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, S.S. Inozemtsev // Nanotechnologies in construction: scientific online journal. – 2012. – Vol. 4, No. 1. – P. 6–14.
12. Smirnov, V.A. Modeling and tools for numerical analysis in nanotechnology of materials science: a review / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, A.V. Evstigneev // Nanotechnologies in construction: a scientific online journal. – 2014. – Vol. 6, No. 5. – P. 34–58.
13. Garkina, I.A. Formalization of the assessment of the structure and properties of composite materials for special purposes / I.A. Garkina // Construction materials. – 2007. – No. 1. – P. 70–72.
14. Albakasov, A.I. System design of sulfur composite materials / A.I. Albakasov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 2. – P. 18–27.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.012.

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_59

*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

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

**Снежкина Ольга Викторовна,**  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

**Snezhkina Olga Viktorovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

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

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

**Стешин Кирилл Михайлович,**  
студент  
E-mail: steshina2701@gmail.com

**Steshin Kirill Mikhailovich,**  
Student  
E-mail: steshina2701@gmail.com

### ПРОЧНОСТЬ НАКЛОННОГО СЕЧЕНИЯ ИЗГИБАЕМОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА

О.В. Снежкина, А.И. Шейн, К.М. Стешин

Предлагается единый подход к оценке прочности наклонных сечений в зоне действия поперечных сил, позволяющий учесть совместное влияние момента, поперечной и продольной сил в расчетных сечениях. Рассматривается возможность представления расчетной модели железобетонной балки в виде двухшарнирной арки с затяжкой. Работа железобетонной балки представляется в виде распорной системы с горизонтальным растянутым поясом (продольной арматурой) и сжатой бетонной аркой криволинейного очертания. Предложены альтернативные расчетные зависимости для оценки прочности железобетонных балок без поперечного армирования на действие поперечных сил, соответствующие экспериментально-теоретическим исследованиям.

*Ключевые слова: железобетонная балка, относительный пролет среза, прочность наклонного сечения, физическое моделирование, двухшарнирная арка с затяжкой*

### STRENGTH OF AN INCLINED SECTION OF A BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENT

O.V. Snezhkina, A.I. Shein, K.M. Steshin

A unified approach is proposed for assessing the strength of inclined sections in the zone of action of transverse forces, which makes it possible to take into account the combined influence of the moment, transverse and longitudinal forces in the design sections. The possibility of representing the

design model of a reinforced concrete beam in the form of a two-hinged arch with a tightening is considered. The work of a reinforced concrete beam is presented in the form of a spacer system with a horizontal stretched belt (longitudinal reinforcement) and a compressed concrete arch of a curvilinear outline. Alternative design dependencies are proposed for estimating the strength of reinforced concrete beams without transverse reinforcement on the action of transverse forces, corresponding to experimental and theoretical studies.

*Keywords: reinforced concrete beam, relative shear span, sloping section strength, physical modeling, double-hinged arch with tightening*

Действующий Свод правил (СП 63.13330.2018) содержит методику расчета изгибаемых железобетонных элементов, обеспечивающую единый подход к расчету нормальных сечений по двум группам предельных состояний. Исключение составляет расчет железобетонных балок на действие поперечных сил. До настоящего времени не устранен ряд вопросов по использованию нормативных методов расчета изгибаемых железобетонных элементов [1–4]. К определяющим недостаткам расчета в зоне действия поперечных сил можно отнести:

– полуэмпирический характер и определенные границы применения существующих зависимостей по оценке прочности, что приводит к сомнительным результатам для ряда частных случаев и вызывает затруднения при автоматизации расчетов;

– раздельное рассмотрение уравнений равновесия моментов и поперечных сил, исключающее возможность их взаимного влияния;

– отсутствие рекомендаций по второй группе предельных состояний [5–7].

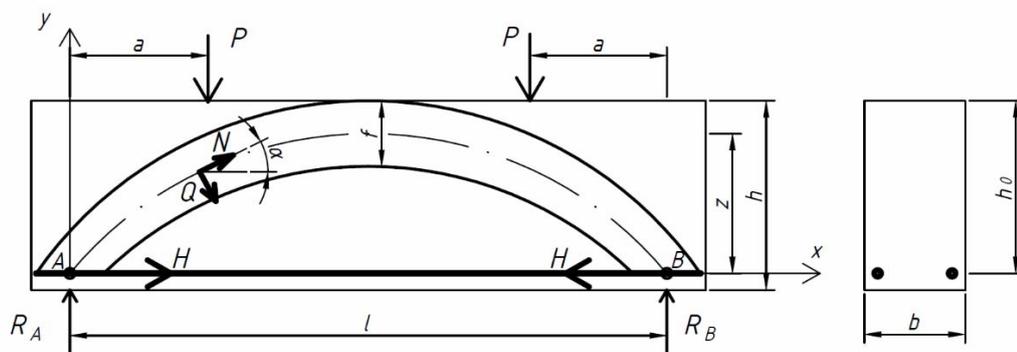
Согласно Своду правил по наклонному сечению должны быть обеспечены: прочность на действие поперечной силы полосы между наклонными сечениями и по наклонному сечению, прочность наклонного сечения на действие моментов. Прочность наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов определяется из условия, что усилия от внешних нагрузок не могут превышать внутренних предельных усилий в наклонном сечении. В каждом случае применяется индивидуальная схема определения усилий, что говорит об отсутствии единой модели расчета по прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил.

Предлагается единый подход к оценке прочности наклонных сечений в зоне действия поперечных сил, позволяющий учесть совместное влияние момента, поперечной и продольной сил в расчетных сечениях.

Ранее на основе экспериментально-теоретических исследований определено напряженно-деформированное состояние железобетонных балок с малым и средним относительным пролетом среза. Выявлено, что в балках с относительным пролетом среза  $a/h_0 \leq 1,5$  главные сжимающие напряжения концентрируются в наклонных участках, расположенных между грузовой и опорными площадками. Главные растягивающие напряжения концентрируются в горизонтальных участках, расположенных вдоль нижней грани балки. Согласно напряженно-деформированному состоянию балок поверхность бетона разделена на четыре характерные зоны. Первая зона представляет собой наклонные полосы, расположенные между грузовой и опорными площадками, в пределах которых концентрируются главные сжимающие напряжения. Вторая зона представляет собой горизонтальный участок в нижней части балки, в пределах которого концентрируются главные растягивающие напряжения. Третья и четвертая зоны располагаются с внутренней и с внешней стороны сжатого наклонного участка бетона и характеризуются малыми напряжениями [8, 9]. Характер напряженно-деформированного состояния коротких балок отражен в расчетной каркасно-стержневой модели (трехшарнирная арка прямолинейного очертания) [10–12]. Учитывая, что расчетная каркасно-стержневая модель отражает физическую работу коротких железобетонных элементов, рассмотрим модернизацию этой модели в виде двухшарнирной арки с затяжкой, что согласуется с траекториями распределения главных сжимающих и растягивающих напряжений в изгибаемых железобетонных элементах без распределенного армирования с относительным пролетом среза до 4.

Работа железобетонной балки представляется как распорная система с горизонтальным растянутым поясом, представленным продольной арматурой и сжатой

бетонной аркой криволинейного очертания (см. рисунок). Для обоснования расчетной модели произведен расчет прочности железобетонных балок без распределенного армирования (с относительным пролетом среза от 2 до 4). В расчете использовались характеристики балок из ранее проведенных экспериментальных исследований Д. Кани (Американский институт бетона) (табл. 1). Схема нагружения показана на рисунке. Все опытные образцы имели единую схему разрушения – по наклонной трещине.



Расчетная модель определения внутренних силовых факторов

Т а б л и ц а 1

Геометрические и прочностные характеристики опытных образцов

№	$b$ , м	$h_0$ , м	$a$ , м	$l$ , м	$a/h_0$	$A_s$ , м <sup>2</sup>	$R_{ss}$ , МПа	$R_b$ , МПа	$2P_u$ , кН
1	0,153	0,273	0,543	2,000	2	0,0012	351,63	23,17	220
2	0,152	0,272	0,679	2,273	2,5	0,0011	366,11	26,20	168
3	0,156	0,271	0,814	2,542	3	0,0012	342,66	27,44	130
4	0,151	0,271	1,085	3,085	4	0,0012	341,98	27,44	110

Как установлено многочисленными опытами, разрушение железобетонных элементов от действия поперечных сил происходит по наклонному сечению, проходящему по наклонной трещине, при разрушении бетона над наклонной трещиной. В рассматриваемой расчетной модели балка представляется системой, учитывающей влияние геометрических и прочностных характеристик железобетонной балки: прочность бетона и продольной арматуры, модуль упругости бетона и продольной арматуры, высота, ширина балки, относительный пролет среза, площадь сечения продольной арматуры, жесткость арки соответственно при изгибе, сдвиге и растяжении-сжатии. Принципы работы многокритериальных систем подробно рассмотрены в работах [13, 14].

В проведенном исследовании решался вопрос определения продольных, поперечных усилий и моментов над вершиной трещины в наклонном сечении при нагрузке, приводящей к разрушению конструкции.

При расчете арки применен метод сил. В расчетной схеме криволинейная ось арки изменяется по параболическому закону:

$$y = \frac{4z}{l^2} x(l-x),$$

угол наклона касательной в расчетных сечениях

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{4z}{l^2} (l-2x).$$

Ширина арки  $f$  (сжатого бетонного подкоса) определялась согласно действующему Своду правил из условия равновесия нормального сечения в стадии разрушения при  $N_s=N_b$ :

$$f = R_s A_s / R_b b.$$

Усилия в бетоне над наклонной трещиной представлены в виде продольной и поперечной составляющих  $N$  и  $Q$  (см. рисунок).

Расчетные величины определялись с использованием приближенного численного интегрирования по оси  $Ox$  ( $dx=\cos\alpha ds$ ) при разбиении пролета балки  $l$  на  $n$  частей с шагом  $\Delta x=0,1$  м.

Усилие в рабочей растянутой арматуре (в затяжке арки) определяется соотношением

$$H = - \frac{\int_0^s \frac{\overline{M}_1 M_p ds}{EJ} + \int_0^s k \frac{\overline{Q}_1 Q_p}{GA} + \int_0^s \frac{\overline{N}_1 dN_p s}{EA}}{\int_0^s \frac{\overline{M}_1^2 ds}{EJ} + \int_0^s k \frac{\overline{Q}_1^2 ds}{GA} + \int_0^s \frac{\overline{N}_1^2 ds}{EA} + \int_0^l \frac{H_1^2 dx}{EA_s}},$$

где  $EI$ ,  $GA$ ,  $EA$  – жесткости арки соответственно при изгибе, сдвиге и растяжении-сжатии;  $k$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по высоте сечения арки при изгибе;  $\overline{M}_1$ ,  $\overline{Q}_1$ ,  $\overline{N}_1$  – законы изменения эпюр моментов, поперечных и продольных сил в арке от действия единичной силы в затяжке;  $H$  – действительное усилие в затяжке (в нижней рабочей арматуре);  $M_p$ ,  $Q_p$ ,  $N_p$  – законы изменения эпюр моментов, поперечных и продольных сил в арке от действия внешней нагрузки, выраженные через балочные значения.

Окончательные эпюры изгибающих моментов, продольных и поперечных сил определены по зависимостям:

$$M = -yH + M_p,$$

$$Q = -\sin \alpha H + Q_p,$$

$$N = -\cos \alpha H + N_p.$$

По эпюрам изгибающих моментов, продольных и поперечных сил выявлены наиболее опасные сечения, определены напряжения. Результаты расчета (в точках над вершиной трещины при нагрузке, приводящей к разрушению конструкции) приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Расчетные усилия и напряжения, действующие в бетоне над трещиной в наклонном сечении

$a/h_0$	$X$ , м	$Y$ , м	$H$ , кН	$M$ , Нм	$Q$ , кН	$N$ , кН	$\sigma_b \cdot 10^6$ , МПа	$\tau_b \cdot 10^6$ , МПа
2	0,55	0,22	234	10669	52,612	-227,359	-13,78	3,41
2,5	0,7	0,23	217	9077	43,313	-213,061	-13,51	2,79
3	0,8	0,24	196	5885	34,070	-193,165	-13,32	2,16
4	1	0,24	198	7330	30,941	-196,473	-13,58	2,03

Расчетная модель позволяет определить усилия, действующие в бетоне над наклонной трещиной. Учитывая, что бетон в зоне над наклонной трещиной находится в условиях плоского напряженного состояния, предельные значения нормальных и касательных напряжений могут быть найдены из критерия прочности бетона, выраженного через главные взаимно перпендикулярные напряжения и сопротивление

бетона по прочности на сжатие и сопротивления бетона по прочности на растяжения. Исходя из этого критерия, при определенных упрощениях может быть установлено соотношение предельных нормальных и касательных напряжений, действующих в этом сечении. Предельные значения нормальных и касательных напряжений можно принять равными их максимальным значениям  $\sigma_{b,ult}=R_b$  и  $\tau_{b,ult}=2 R_{bt}$  (либо некоторым средним значениям, например:  $\sigma_{b,ult}=0,5R_b$  и  $\tau_{b,ult}=1,5 R_{bt}$ ) [2].

Результат проведенного исследования подтверждает данное предположение. При разрушающей нагрузке предельные значения нормальных и касательных напряжений над вершиной наклонной трещины (см. табл. 2) составили:

– в балке с  $a/h_0=2$  ( $2P_{ult}=222$  кН)  $\sigma_b = -13,8$  МПа,  $\tau_b=3,4$  МПа, что соответствует  $\sigma_{b,ult}=0,5R_b$  и  $\tau_{b,ult}=1,6 R_{bt}$ ;

– в балке с  $a/h_0=2,5$  ( $2P_{ult}=168$  кН)  $\sigma_b = -13,5$  МПа,  $\tau_b=2,8$  МПа, что соответствует  $\sigma_{b,ult}=0,5R_b$  и  $\tau_{b,ult}=1,4 R_{bt}$ ;

– в балке с  $a/h_0=3$  ( $2P_{ult}=130$  кН)  $\sigma_b = -13,3$  МПа,  $\tau_b=2,16$  МПа, что соответствует  $\sigma_{b,ult}=0,5R_b$  и  $\tau_{b,ult}=1,1 R_{bt}$ ;

– в балке с  $a/h_0=4$  ( $2P_{ult}=110$  кН)  $\sigma_b = -13,6$  МПа,  $\tau_b=2,05$  МПа, что соответствует  $\sigma_{b,ult}=0,5R_b$  и  $\tau_{b,ult}=1,0 R_{bt}$ .

Применяя равномерное распределение нормальных и касательных напряжений по высоте зоны бетона над наклонной трещиной и максимальные значения предельных нормальных и касательных напряжений, получим выражения для предельных продольных и поперечных усилий  $Q_b$  и  $N_b$  в вершине над наклонной трещиной:

$$N_b = N_{b,ult}$$

или

$$Q_b = Q_{b,ult},$$

где  $N_{b,ult}=0,5 R_b b f$  (или  $Q_{b,ult}=1,5 R_{bt} b f$ ).

Неравномерность распределения напряжений по ширине арки над вершиной наклонной трещины может быть скорректирована поправочными коэффициентами (при дополнительных экспериментальных исследованиях).

Тогда согласно расчетной модели усилия, действующие в наклонном сечении, выраженные через внешние усилия, определяются как

$$N = -H \cos \alpha - Q_p \sin \alpha$$

или

$$Q = -H \sin \alpha + Q_p \cos \alpha,$$

а расчетные условия прочности железобетонных балок без поперечной арматуры на действие поперечных сил можно представить в виде

$$N \leq N_b$$

или

$$Q \leq Q_b.$$

#### Выводы

Предложен альтернативный метод оценки прочности наклонного сечения изгибаемых железобетонных элементов без распределенной арматуры с относительным пролетом среза  $2 \leq a/h_0 \leq 4$  в зоне действия поперечных сил по арочной модели.

Работа железобетонной балки представлена как распорная система с горизонтальным растянутым поясом, состоящим из продольной арматуры и сжатой бетонной арки криволинейного очертания.

Расчетная модель позволяет определить продольные и поперечные усилия, действующие в бетоне над наклонной трещиной.

Расчетные значения нормальных и касательных напряжений в сечении над вершиной трещины соответствуют критерию прочности бетона при плоском напряженном состоянии, выраженном через главные взаимно перпендикулярные напряжения и сопротивление бетона по прочности на сжатие и сопротивления бетона по прочности на растяжения.

Расчет прочности наклонного сечения учитывает влияние геометрических и прочностных характеристик железобетонной балки: прочность бетона и продольной арматуры, модуль упругости бетона и продольной арматуры, высоту, ширину балки, относительный пролет среза, площадь сечения продольной арматуры, жесткость арки соответственно при изгибе, сдвиге и растяжении-сжатии.

### Список литературы

1. Кодыш, Э.Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трекин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №6. – С. 25–28.
2. Залесов, А.С. Краткие заметки о расчете железобетонных конструкций на действие изгибающих моментов и продольных сил / А.С. Залесов. – М.: 2008. – 117 с.
3. Краснощеков, Ю.В. О поперечной силе, воспринимаемой бетоном в наклонном сечении железобетонных элементов / Ю.В. Краснощеков // Вестник СибАДИ. – 2018. – Т. 15, №3(61). – С. 434–444.
4. Краснощеков, Ю.В. Расчетная модель сопротивления поперечной силе железобетонных изгибаемых элементов / Ю.В. Краснощеков // Вестник СибАДИ. – 2019. – Т. 16, №2(66). – С. 182–192.
5. Старишко, И.Н. Совершенствование методики расчета изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям / И.Н. Старишко // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – №5. – С. 31–40.
6. Филатов, В.Б. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил / В.Б. Филатов, А.С. Арцыбасов, М.А. Багаутдинов, Д.И. Гордеев, А.И. КОРТУНОВ, Р.А. НИКИТИН // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С. 642–645.
7. Филатов, В.Б. Результаты экспериментального исследования сопротивления железобетонных балок в зоне поперечного изгиба / В.Б. Филатов, В.О. Горынцев, В.П. Биндер // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, №4. – С. 25–31.
8. Баранова, Т.И. Моделирование работы коротких железобетонных балок / Т.И. Баранова, Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, Р.А. Ладин // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 2 (36). – С. 54–60.
9. Шеин, А.И. Экспериментально-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния коротких железобетонных балок / А.И. Шеин, О.В. Снежкина, А.А. Киселев, Р.А. Ладин // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 4 (38). – С. 94–99.
10. Баранова, Т.И. Каркасно-стержневые расчетные модели и инженерные методы расчета железобетонных конструкций / Т.И. Баранова, А.С. Залесов. – М.: АСВ, 2003. – 240 с.
11. Лаврова, О.В. Прочность железобетонных коротких балок на основе каркасно-стержневых моделей / О.В. Лаврова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1(34). – С. 91–96.
12. Снежкина, О.В. Моделирование работы железобетонных балок с относительным пролетом среза  $a/h_0$  от 1 до 3 / О.В. Снежкина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1(42). – С. 156–162.
13. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38). – С. 119–123.
14. Garkina, I.A. Property modelling and durability of composite materials / I. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032004.

### References

1. Kodysh, E.N. Improvement of the regulatory framework for the design of reinforced concrete structures / E.N. Kodysh, N.N. Trekin // Industrial and civil construction. – 2016. – No. 6. – P. 25–28.

2. Zalesov, A.S. Brief notes on the calculation of reinforced concrete structures for the action of bending moments and longitudinal forces / A.S. Zalesov. – M., 2008. – 117 p.
3. Krasnoshchekov, Yu.V. On the transverse force perceived by concrete in an inclined section of reinforced concrete elements / Yu.V. Krasnoshchekov // Bulletin of SibADI. – 2018. – Vol. 15, No. 3(61). – P. 434–444.
4. Krasnoshchekov, Yu.V. Calculation model of resistance to transverse force of reinforced concrete bending elements / Yu.V. Krasnoshchekov // Bulletin of SibADI. – 2019. – Vol. 16, No.2(66). – P. 182–192.
5. Starishko, I.N. Improving the methodology for calculating bent reinforced concrete elements according to inclined sections / I.N. Starishko // Industrial and civil construction. – 2019. – No. 5. – P. 31–40.
6. Filatov, V.B. Analysis of calculation models in the calculation of the strength of inclined sections of reinforced concrete beams on the action of transverse forces / V.B. Filatov, A.S. Artsybasov, M.A. Bagautdinov, D.I. Gordeev, A.I. Kortunov, R.A. Nikitin // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 16, No. 4 (3). – P. 642–645.
7. Filatov, V.B. Results of an experimental study of the resistance of reinforced concrete beams in the zone of transverse bending / V.B. Filatov, V.O. Goryntsev, V.P. Binder // Urban planning and architecture. – 2017. – Vol. 7, No. 4. – P. 25–31.
8. Baranova, T.I. Modeling of the work of short reinforced concrete beams / T.I. Baranova, Yu.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, R.A. Ladin // Vestnik SibADI. – 2014. – No. 2 (36). – P. 54–60.
9. Shein, A.I. Experimental and theoretical study of the stress-strain state of short reinforced concrete beams / A.I. Shein, O.V. Snezhkina, A.A. Kiselev, R.A. Ladin // Bulletin of SibADI. – 2014. – No. 4 (38). – P. 94–99.
10. Baranova, T.I. Frame-rod design models and engineering methods for calculating reinforced concrete structures / T.I. Baranova, A.S. Zalesov. – M.: Publishing House of ASV, 2003. – 240 p.
11. Lavrova, O.V. Strength of reinforced concrete short beams based on frame-rod models / O.V. Lavrova // Regional architecture and engineering. – 2018. – №1(34). – P. 91–96.
12. Snezhkina, O.V. Modeling of operation of reinforced concrete beams with relative shear span  $a/h_0$  from 1 to 3 / O.V. Snezhkina // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1(42). – S. 156–162
13. Garkina, I.A. Unified concept of system design of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1 (38) – P. 119–123.
14. Garkina, I.A. Property modeling and durability of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032004.

УДК 624

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_66

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Гарькин Игорь Николаевич,**  
доцент кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: igor\_garkin@mail.ru

**Гарькина Ирина Александровна,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

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

Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

**Клюев Сергей Васильевич,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теоретическая механика  
и сопротивление материалов»

*ООО «Современные строительные  
решения»*

Россия, г. Пенза, ул. Аксакова, 38г

**Саденко Денис Сергеевич,**  
главный инженер, кандидат технических  
наук

E-mail: sadenko\_d@list.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Garkin Igor Nikolaevich,**  
Associate Professor of the department  
«Quality Management and Construction  
Technologies»  
E-mail: igor\_garkin@mail.ru

**Garkina Irina Aleksandrovna,**  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Mathematics  
and Mathematical Modeling»

E-mail: fmatem@pguas.ru

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

Russia, Belgorod, 46, Kostyukova St.

**Klyuev Sergey Vasilyevich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Theoretical Mechanics and  
Resistance of Materials»

*LLC «Modern building solutions»*

Russia, Penza, , 38g, Aksakova St.

**Sadenko Denis Sergeevich,**  
Leading engineer, Candidate of Sciences  
E-mail: sadenko\_d@list.ru

## ИЗ ОПЫТА ЭКСПЕРТИЗЫ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина, С.В. Клюев, Д.С. Саденко

На примере комплексного обследования здания в г. Новый Уренгой предлагаются методы технической экспертизы и мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера. Учитывается неоднородность расположения элементов термостабилизации грунта под зданием, что затрудняет анализ и прогноз состояния грунтов. По данным натурных обследований и проведенных расчетов даются рекомендации по их дальнейшей эксплуатации.

*Ключевые слова: здания и сооружения, условия Крайнего Севера, мониторинг, техническая экспертиза, термостабилизаторы*

## FROM THE EXPERIENCE OF EXAMINATION CONSTRUCTIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF THE FAR NORTH

I.N. Garkin, I.A. Garkina, S.V. Klyuev, D.S. Sadenko

Using the example of a comprehensive survey of a building in the city of Novy Urengoy, methods of technical expertise and monitoring of constructions of buildings and structures operating in the Far North are proposed. The heterogeneity of the location of the elements of thermal

stabilization of the soil under the building is taken into account, which makes it difficult to analyze and predict the state of the soil. According to field surveys and calculations, recommendations for their further operation are given.

*Keywords: buildings and structures, conditions of the Far North, monitoring, technical expertise, heat stabilizers*

Государством вкладываются значительные средства в развитие территорий Крайнего Севера. Это требует осуществления перманентного мониторинга и совершенствования методов обследования конструкций различных зданий и сооружений [1...5]. На примере выполнения комплексного обследования здания в г. Новый Уренгой даются рекомендации к проведению технической экспертизы конструкций зданий и сооружений, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера.

**Эмпирические данные.** Производилось обследование административного здания в г.Новый Уренгой (начало эксплуатации – 2001 г.). Здание четырехэтажное (4-й этаж – мансардный), прямоугольной формы – 81,6×13,8 м; объем строения – 8037 куб.м ( $H=15$  м); объем гаража – 1579 куб.м ( $H = 4,4$  м); кровля здания – профилированный лист по деревянной обрешетке; стены – керамзитобетонные блоки; фундаменты – железобетонные сваи, ростверк – железобетонный. Конструктивная схема обследуемой части здания – бескаркасная, с несущими стенами из керамзитобетона (легкий ячеистый бетон); состоит из 3 блоков, разделенных деформационными швами. Перекрытие выполнено из сборных железобетонных плит, образующих жесткую горизонтальную диафрагму, которая связывает несущие стены, обеспечивая пространственную жесткость всего здания. Имеются подпольное и чердачное помещения.

Сначала были проанализированы: паспорт здания, проектная документация, документации предыдущих обследований, протоколы испытаний отдельных конструктивных элементов. Далее составлялась и согласовывалась с заказчиком программа обследования: методика обследования, состав экспертной комиссии, используемые приборы и средства измерения; полевые работы – после утверждения программы обследования. Перед экспертной комиссией ставились вопросы, связанные с состоянием фундаментов, термостабилизаторов и термоскважин. Обследование проводилось инструментальным методом с использованием приборов для определения прочности бетона неразрушающими методами (ультразвуковым и тепловизионным). В конструктивной схеме фундаментов использовалось 283 сваи сечением 300×300 мм, соединенные в поперечном направлении монолитным ж/б ростверком; на него уложены плиты перекрытия подполья 5980×1490×220 мм (серия 1.141-1 «Панели перекрытий железобетонные многпустотные»); по внешней стороне – сборные ж/б балки.

Для оценки технического состояния выполнялись работы: визуальный осмотр поверхностей свай и ростверков на наличие видимых дефектов и повреждений; определение средней прочности бетона ультразвуковым методом; оценка несущей способности фундаментов; инструментальное тепловизионное исследование работоспособности термостабилизаторов грунта.

В ходе инструментального обследования производились расчеты с использованием программно-вычислительного комплекса SCAD: расчет сваи на сжимающую нагрузку (п. 7.2 СП 25.13330.2012); уровень ответственности сооружения – нормальный; коэффициент надежности по ответственности – 1.

Оказалось, что

$$F = F_u,$$

$$F_u = \gamma_t \cdot \gamma_c \cdot (R \cdot A + \sum_{i=1}^n R_{af,i} \cdot A_{af,i}) = 1 \cdot 0.971 \cdot (12000 \cdot 0.1256) = 1464 \text{ кН} = 149 \text{ т.}$$

По геологическим условиям:

$$R = 12 \text{ МПа} = 12000 \text{ кПа};$$

$$\begin{aligned} \gamma_t &= 1,15 \cdot (1 + v^2) - 1,61 \cdot v \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{\tau}{v}\right)} = \\ &= 1,15 \cdot (1 + 0,044^2) - 1,61 \cdot 0,044 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{30}{0,044}\right)} = 0,971; \end{aligned}$$

$$v = \frac{0,45 \cdot \left[ \frac{(T_{bf} - T_0')}{A} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \sigma \cdot D_{m,e}}{T_{bf} - T_{m,e} - C \sqrt{(T_{bf} - T_{m,e})}} = \frac{0,45 \cdot \left[ \frac{(-0,2 + 4,97)}{15,7} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot 1,49 \cdot 0,41}{-0,2 + 4,92 - 0,24 \sqrt{(-0,2 + 4,92)}} = 0,044;$$

$$T_{bf} = A - B \cdot (53 \cdot C_{ps} + 40C_{ps}^2) = -0,2 - 0 = -0,2^\circ\text{C};$$

$$\begin{aligned} T_0' = T_0 &= \frac{1}{t_y} \cdot \left[ (T_{f,m} - T_{bf}) \cdot t_{f,m} + L_v \cdot d_{th,n} \cdot \left( \frac{d_{th,n}}{2\lambda_f} + R_s \right) \right] + T_{bf} = \\ &= \frac{1}{3,15 \cdot 10^7} \cdot \left[ (-19 + 0,2) \cdot 2,134 \cdot 10^7 + 5,7 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot \left( \frac{3}{2 \cdot 1,67} + 0,57 \right) \right] - 0,2 = -4,97^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

$$L_v = 5,7 \cdot 10^7 \text{ Дж / м}^3 \text{ (принято по геологическим условиям);}$$

$$R_s = \frac{d_s}{s} = \frac{0,35}{0,61} = 0,57 \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}};$$

$$\lambda_s = m_d \cdot (0,18 + 0,87 \cdot p_s) = 1,16 \cdot (0,18 + 0,87 \cdot 0,4) = 0,61 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}};$$

$$T_m = (T_0 - T_{bf}) \cdot \alpha_m \cdot k_{ts} + T_{bf} = (-4,97 + 0,2) \cdot 0,99 \cdot 1 - 0,2 = -4,92^\circ\text{C}.$$

Расчет свай на выдергивающую нагрузку выполнен по п. 7.2 СП 25.13330.2012; расчетное сопротивление мерзлого грунта – по табл. В.3 СП 25.13330.2012 в соответствии с п 5.9 СП 25.13330.2012:

$$F_{du} = \gamma_t \cdot \gamma_c \cdot u \cdot \sum R_{af,i} \cdot h_i = 1 \cdot 0,971 \cdot 1,256 \cdot ((100 \cdot 3,8)) = 463 \text{ кН} = 47,2 \text{ т};$$

$$F_d = \frac{F_{du}}{\gamma_g} = \frac{47,2}{1,4} = 33,7 \text{ т}.$$

Сваи под зданием на выдергивающие усилия не работают; данные используются для анализа допустимого морозного пучения грунтов. Исходя из несущей способности свай на выдергивание и сечения свай, допустимая зона морозного пучения грунта принимается равной 3,3 м; при превышении этого значения появляется вероятность «выдергивания» свай силами морозного пучения сезоннооттаивающих грунтов (зависит от уровня грунтовых вод на момент замерзания). Рекомендуется подсыпка из керамзита (толщиной 200 мм) в подполе (предохраняет грунты в основании от излишнего оттаивания в летний период и минимизирует риски «выдергивания» свай из грунта). Расчет фундаментов производился в ПК SCAD [6...8].



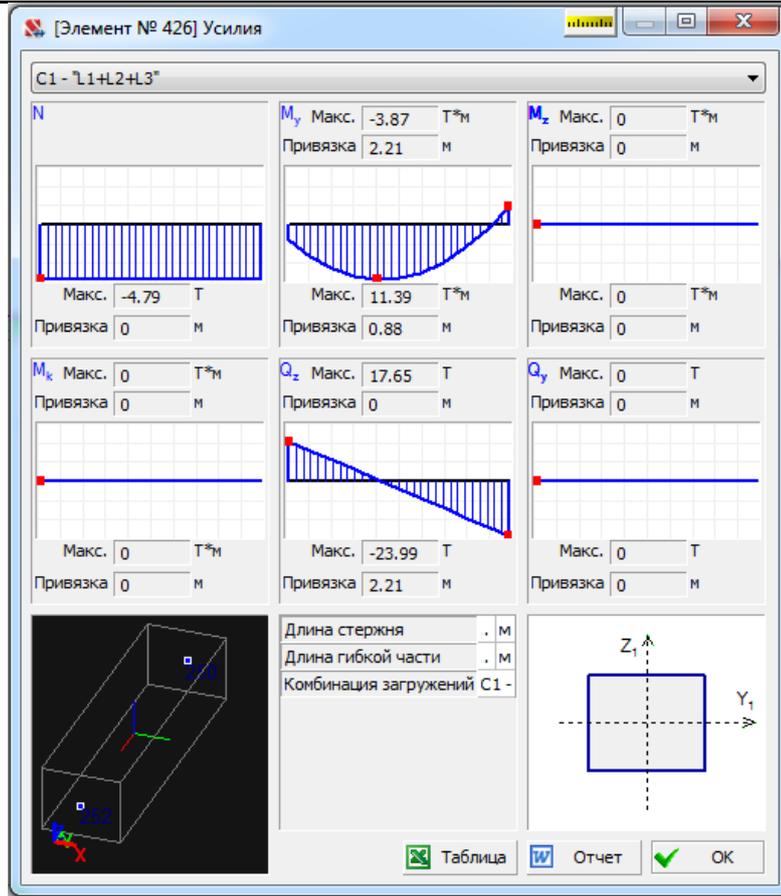


Рис. 5. Усилия в самом нагруженном элементе

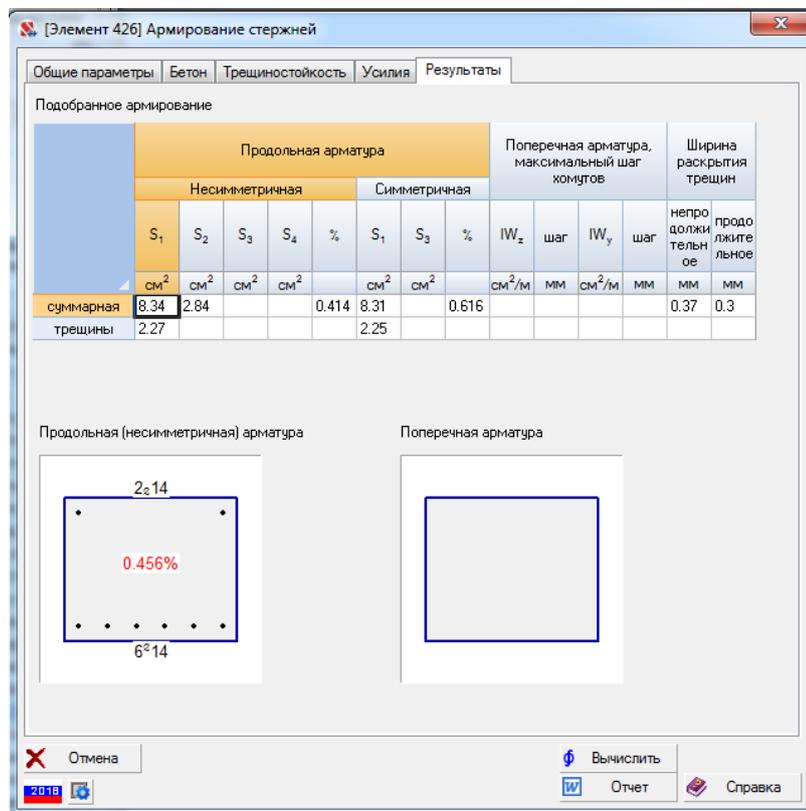


Рис. 6. Армирование наиболее нагруженного элемента

Как видим из рис. 1–6:

1) несущая способность свай фундамента обеспечена (допустимая нагрузка на сваю – 149 тс; максимальная нагрузка на сваю – 59,45тс); использование НС свай не превышает 40 %;

2) расчетное армирование ростверка не превышает конструктивного армирования, применяемого для подобного вида конструкций;

3) разница осадок ростверков не превышает 3мм и не превышает значений, установленных СП 22.13330.2016 «Основания и фундаменты» (обеспечивает прочность и устойчивость фундаментов);

4) конструктивное решение свайных фундаментов позволяет частично компенсировать и частично воспринять возможные силы морозного пучения сезоннооттаивающих грунтов основания; при нарушении мероприятий по компенсации сил морозного пучения (применяются рулонные гидроизолирующие материалы в верхней части свай) использование НС свай на «выдергивание» не превышает 75 %.

**Рекомендации.** По данным метеонаблюдений, за последнее десятилетие глубина оттаивания вечномерзлых грунтов увеличивается. Для сохранения глубины оттаивания грунтов рекомендуется понизить теплопроводность верхних слоев грунта. Возможны следующие методы:

– керамзитная засыпка толщиной не менее 200 мм в зоне устройства свайных фундаментов (не менее 2,5 м от крайних свай);

– замена верхнего слоя подбетонки («конвертовки») грунта утеплителем (жесткая базальтовая минеральная вата или экструдированный пенополистирол) толщиной 150 мм с последующей защитой утеплителя ж/б стяжкой толщиной 50-70 мм с «разуклонкой» от здания (минимальное расстояние от крайнего ряда свай до конца утеплителя – 2,5 м);

– сооружение системы заморозки грунтов в летнее время не рассматривается (экономически не эффективна).

Выявлены локальные нарушения защитных слоев бетона при выполнении монолитных ростверков. На момент обследования конструкции находятся в работоспособном состоянии. Рекомендуется обмазочная защита открытых элементов фундамента (в зонах видимого нарушения защитных слоев) битумной мастикой в 2 слоя.

**Оценка работы термостабилизаторов здания.** С учетом особенностей проектирования фундаментов по ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения», СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» особое внимание при визуально-инструментальном обследовании уделялось сезонно действующим охлаждающим устройствам, используемым при строительстве в криолитозоне. Принцип работы всех видов сезонно действующих охлаждающих устройств одинаков. Каждый из них состоит из герметичной трубы, в которой находится теплоноситель – хладагент (углекислота, аммиак и др.). Труба состоит из двух секций: одна размещается в земле (испаритель), вторая (радиаторная секция трубы) расположена на поверхности. Когда температура окружающей среды опускается ниже температуры земли, где залегает испаритель, пары хладагента начинают конденсироваться в радиаторной секции. В результате снижается давление, и хладагент в испарительной части начинает вскипать и испаряться. Этот процесс сопровождается переносом тепла из испарительной части в радиаторную. Упрощенная схема работы термостабилизатора приведена на рис. 7.

В результате проведения обследования фундаментов здания была составлена схема расположения термостабилизаторов. Также была произведена оценка их работоспособности методом тепловизионного контроля (рис. 8).

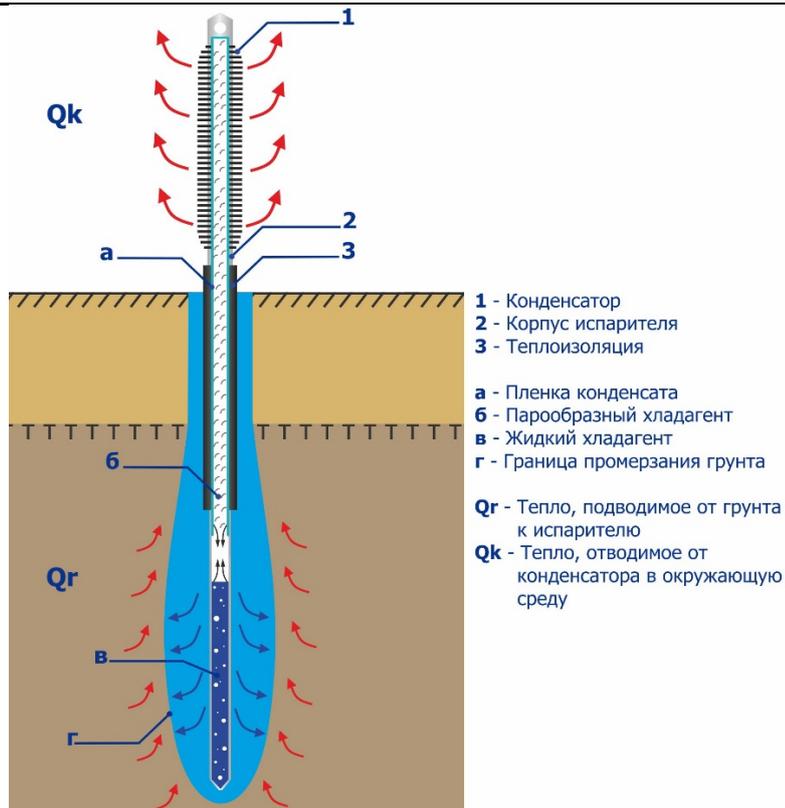


Рис. 7. Упрощенная схема работы сезонно действующего охлаждающего устройства (термостабилизатора)



Рис. 8. К оценке работоспособности термостабилизаторов (тепловизионное обследование)

**Выводы:**

- 1) имеющиеся термостабилизаторы не имеют видимых механических повреждений и следов коррозии металла;
- 2) тепловизионная съемка на всех участках подполья зафиксировала отличие температуры грунта от температуры термостабилизаторов в среднем от 3 до 6 градусов (свидетельствует об их работоспособности); не отводящие тепло от грунта термостабилизаторы не выявлены;
- 3) отмечена неоднородность расположения элементов термостабилизации грунта под зданием, не позволяющая проанализировать и спрогнозировать состояние грунтов в данных зонах, что может привести к недопустимому состоянию основания.

## Список литературы

1. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 4–9.
2. Будылина, Е.А. Основы качественной и количественной оценки качества сложных систем иерархической структуры / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 77–85.
3. Куштин, В.И. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений / В.И. Куштин, А.А. Ревякин, В.А. Соколова, Н.Ф. Добрынин // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 11 (71). – С. 27–37.
4. Саденко, Д.С. Основы научно-технического сопровождения объектов капитального строительства / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин, М.В. Арискин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 89–95.
5. Жуйков, С.В. Эксергетический анализ здания как ключевого элемента системы теплообеспечения / С.В. Жуйков // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 3. – С. 23–40.
6. Корягина, С.А. Информатизация управления строительством как основа предотвращения техногенных аварий / С.А. Корягина // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 4. – С. 11–31.
7. Арискин, М.В. Анализ причин падения башенного крана на основе построения модели в SCAD 11.5 / М.В. Арискин, И.Н. Гарькин // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10-2. – С. 243–247.
8. Гарькин, И.Н. Методы усиления фундаментов гражданских зданий / И.Н. Гарькин, М.В. Глухова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 3 (36). – С. 130–135.

## References

1. Skachkov, Yu.P. Modification of the pattern method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and construction. – 2011. – №1. – P. 4–9.
2. Budylyna, E.A. Fundamentals of qualitative and quantitative assessment of the quality of complex systems of hierarchical structure / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №1 (46). – P. 77–85.
3. Kushtin, V.I. Modern methods of monitoring deformations of buildings and structures / V.I. Kushtin, A.A. Revyakin, V.A. Sokolova, N.F. Dobrynin // Engineering Bulletin of the Don. – 2020. – №11 (71). – P. 27–37.
4. Sadenko, D.S. Fundamentals of scientific and technical support of capital construction objects / D.S. Sadenko, I.N. Garkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2022. – №12 (51). – P. 89–95.
5. Zhuikov, S.V. Exergy analysis of the building as a key element of the heat supply system / S.V. Zhuikov // Building materials and products. – 2021. – Vol. 4, №3. – P. 23–40.

6. Koryagina, S.A. Informatization of construction management as the basis for the prevention of man-made accidents / S.A. Koryagina // Building materials and products. – 2021. – Vol. 4, 4. – P. 11–31.

7. Ariskin M.V., Garkin I.N. Analysis of the reasons for the fall of a tower crane based on the construction of a model in SCAD 11.5 / M.V. Ariskin, I.N. Garkin // Fundamental research. – 2016. – №10–2. – P. 243–247.

8. Garkin, I.N. Methods of strengthening the foundations of civil buildings / I.N. Garkin, M.V. Glukhova // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 3 (36). – P. 130–135.

УДК 624.011.1:621.882.4

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_75

*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

**Мартышкин Даниил Олегович**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: historical95@mail.ru

**Арискин Максим Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: m.v.ariskin@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

**Martyskhin Daniil Olegovich**,  
Postgraduate of the department «Building  
Structures»  
E-mail: historical95@mail.ru

**Ariskin Maksim Vasilievich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building Structures»  
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

## РАССТАНОВКА ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБ В СОЕДИНЕНИЯХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.О. Мартышкин, М.В. Арискин

Представлена методика определения параметров расстановки стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций. Представлены результаты испытаний образцов. Установлены требуемые параметры расстановки стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций.

*Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, шайба, параметры расстановки, стеклопластик*

## ARRANGEMENT OF GLUED FIBERGLASS WASHERS IN CONNECTIONS OF WOODEN STRUCTURES

D.O. Martyskhin, M.V. Ariskin

The method of determining the arrangement parameters of fiberglass washers in connections of wooden structures is presented. The results of samples tests are presented. The required parameters of arrangement of fiberglass washers in connections of wooden structures are established.

*Keywords: wooden structures, connection, washer, parameters of arrangement, fiberglass*

### Введение

Соединения деревянных конструкций чаще всего выполняются с применением металлических связей (гвозди, нагели, металлические зубчатые пластины, шпонки, шайбы), которые вставляются, ввинчиваются, впрессовываются или вклеиваются в деревянные элементы для обеспечения передачи усилий от одного элемента другому [1-5].

На основе достоинств клеенных стальных шайб [4] предлагается соединение немагнитное, коррозионно-стойкое и вместе с тем достаточно прочное [6]. В основу предлагаемого соединения положена идея передачи сосредоточенного усилия, действующего на механические вкладыши на достаточно большую площадь по сравнению с размером самой связи. При этом саму связь предлагается выполнить из материала более прочного и жесткого, чем древесина и, кроме того, химически стойкого и немагнитного. В качестве материала шайб принят стеклотекстолит КАСТ-В.

В [6, 7] было отмечено, что на фактическую величину несущей способности испытанных соединений существенно повлиял недостаточный шаг расстановки шайб в продольном и поперечном направлениях в соединении, о чем свидетельствует

разрушение образцов в результате раскалывания деревянных образцов на участке от торца до шайбы в продольном направлении.

В ходе дальнейших исследований необходимо установить требуемые параметры расстановки стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций.

**Методика определения параметров расстановки стеклопластиковых шайб**

Необходимо установить требуемые параметры расстановки шайб в продольном ( $S_1$ ) и поперечном ( $S_3$ ) направлениях. Параметры расстановки шайб  $S_1$  и  $S_3$  приняты в зависимости от диаметра шайб ( $D_{ш}$ ). Диаметр шайб ( $D_{ш}$ ) равен 80 мм. На основе ранее изученных соединений на клеенных стальных шайбах [4] шаг расстановки в продольном направлении ( $S_1$ ) принимаем равным  $3D_{ш}$ , в поперечном – не менее  $D_{ш}$ . В качестве основного образца берем дощатый элемент с размерами ( $a, b, c$ ). Основные параметры испытываемых образцов показаны на рис. 1.

Образцы на клеенных стеклопластиковых шайбах изготавливались по технологии, описанной в [6]. Все образцы маркировались по каждой серии, в соответствии с маркировкой, представленной в [7].

Основные характеристики испытываемых образцов приведены в таблице.

Основные характеристики испытываемых образцов

Марка	Параметры					Кол-во образцов	Назначение серии образцов
	$a$ , мм	$b$ , мм	$c$ , мм	$D_{ш}$ , мм	$t_{ш}$ , мм		
ВШ-80-10-МН.Г.Д-1	400	200	50	80	10	3	Передача нагрузки через металлические накладки. Определение напряжений в деревянном элементе при передаче нагрузки с центрального болта на шайбы
ВШ-80-10-МН.Г.Д-2							
ВШ-80-10-МН.Г.Д-3							

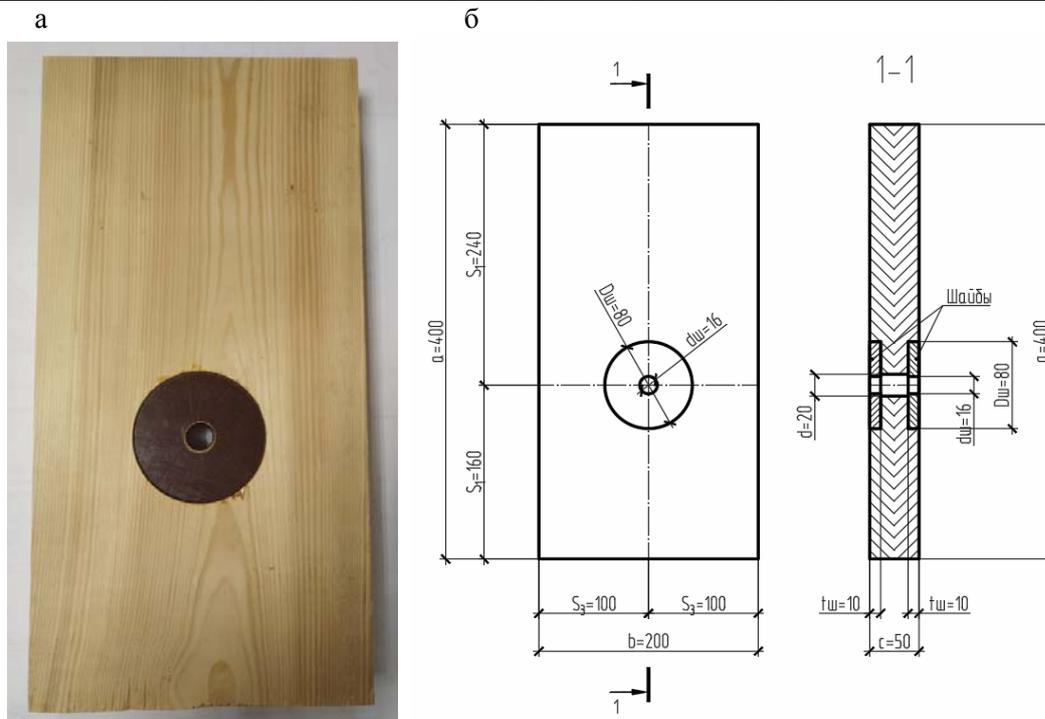


Рис. 1. Образец на клеенных стеклопластиковых шайбах: а – общий вид образца; б – размеры образца

Для определения напряжений на образцы наклеивают тензорезисторы, которые позволяют определить деформации вдоль и поперек волокон древесины. Схемы расстановки тензорезисторов на образцах ВШ-80-10-МН.Г.Д-1, ВШ-80-10-МН.Г.Д-2, ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 представлены на рис. 2-4.

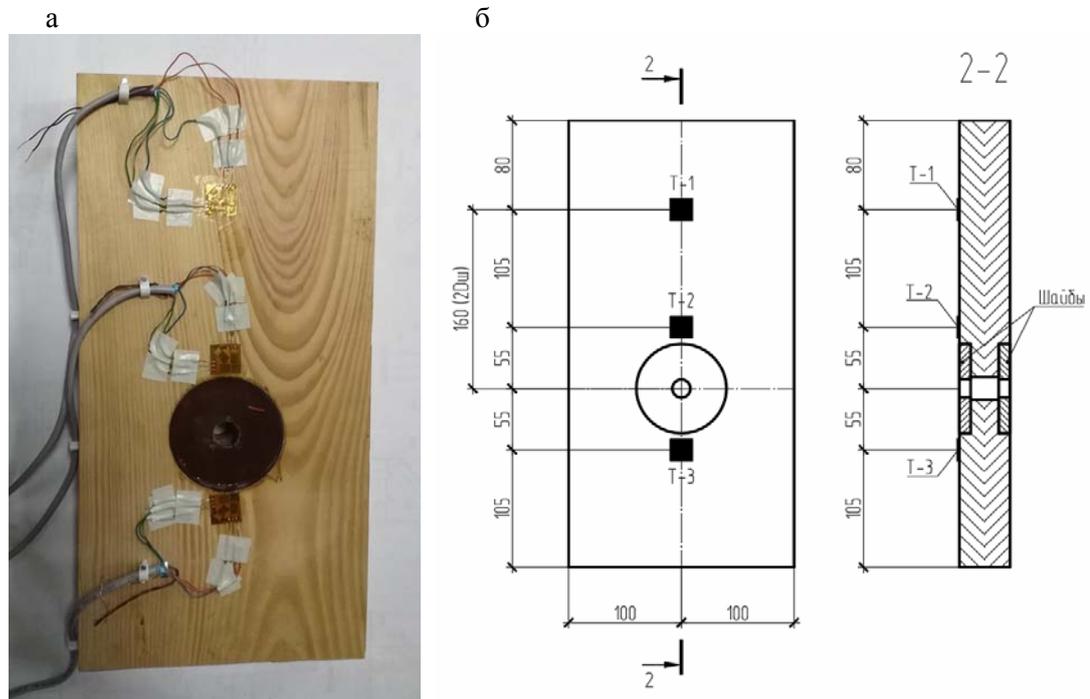


Рис. 2. Схема расстановки тензорезисторов на образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-1:  
а – общий вид образца; б – схема расстановки тензорезисторов

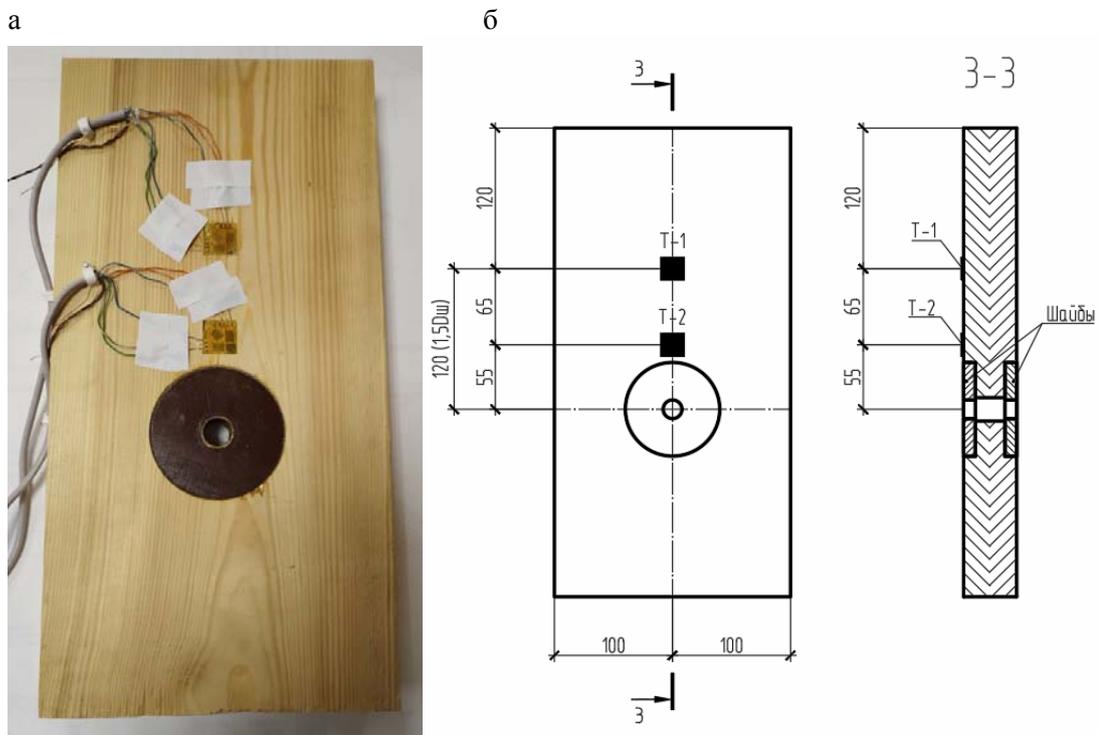


Рис. 3. Схема расстановки тензорезисторов на образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-2:  
а – общий вид образца; б – схема расстановки тензорезисторов

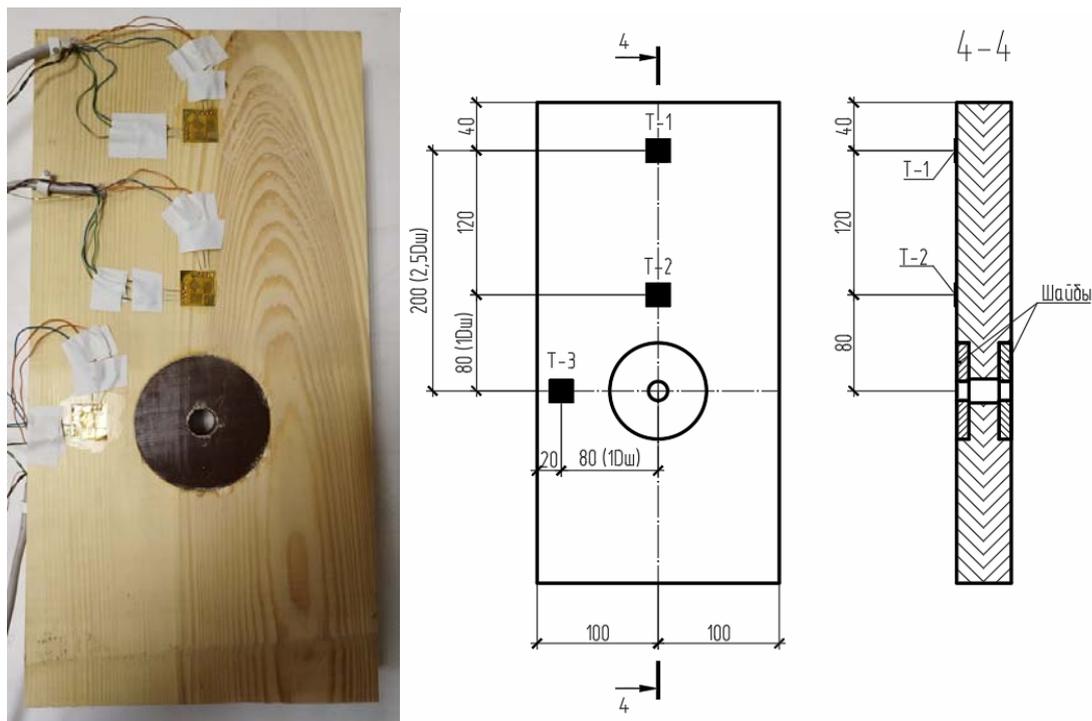


Рис. 4. Схема расстановки тензорезисторов на образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-3:  
а – общий вид образца; б – схема расстановки тензорезисторов

Образцы испытывались по схеме, при которой нагружение образца производилось через металлические накладки, передающие усилия на шайбы (рис. 5, 6), и которая аналогична схеме, при которой нагружение образцов осуществлялось через раму металлическую (РМ) [7].

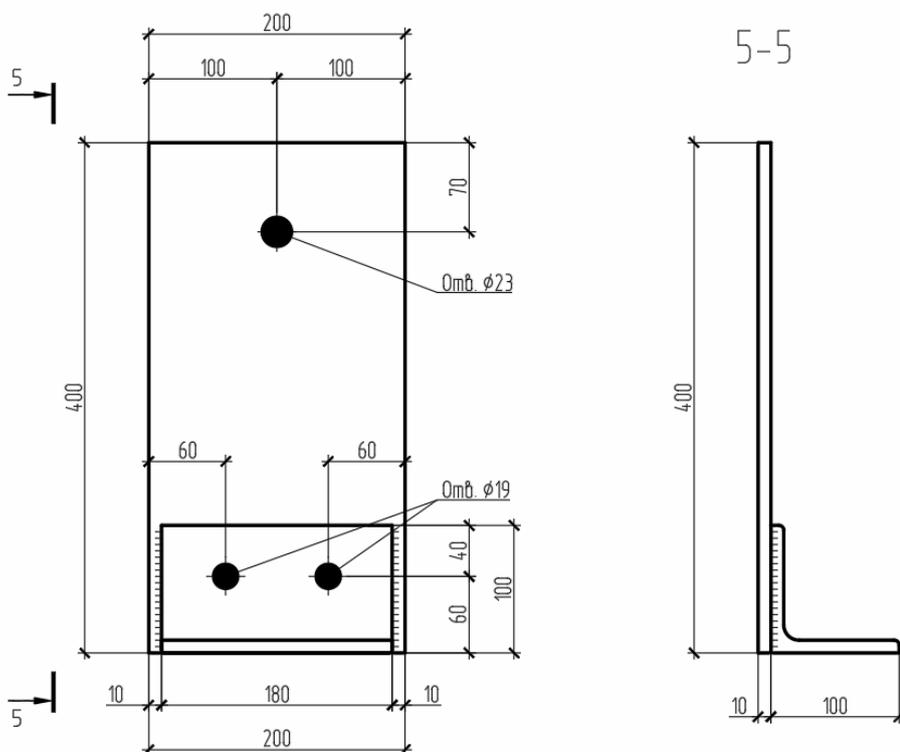


Рис. 5. Металлическая накладка (МН)

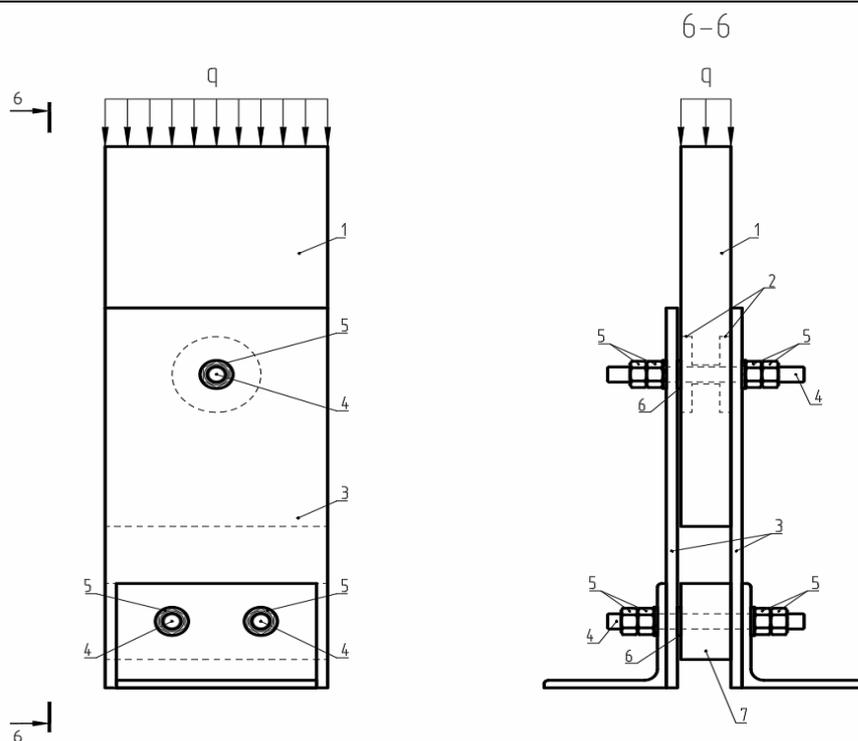


Рис. 6. Схема нагружения образца через металлические накладки:  
1 – деревянный элемент; 2 – клеенные шайбы; 3 – металлическая накладка; 4 – металлическая шпилька; 5 – металлическая гайка; 6 – прокладочная шайба; 7 – деревянная вставка

#### Испытания образцов

Образцы испытывались на сжатие при нормальных температурно-влажностных условиях, т.е. при температуре 18-20°C и относительной влажности воздуха  $W=60-65\%$ . Испытания проводились на гидравлическом прессе П-500 с максимальной нагрузкой 500 кН. Передача нагрузки на образцы осуществлялась ступенчато до 10 кН, 15 кН, 20 кН, 25 кН со скоростью нагружения 2 кН/мин.

Скорость нагружения принималась непрерывной и равномерной с фиксацией начального и конечного времени. В процессе испытаний осуществлялся осмотр образцов. Результаты заносились в журнал испытаний.

Общий вид образца в испытательной установке показан на рис. 7.



Рис. 7. Общий вид образца в испытательной установке

### Результаты испытаний

На начальном этапе производилось нагружение образца до 20 кН для обжатия шайб, после чего осуществлялось ступенчатое нагружение образцов до нагрузки 10 кН, 15 кН, 20 кН, 25 кН.

В процессе испытаний перемещения в образцах не возникали. Графики распределения вертикальных напряжений в образцах ВШ-80-10-МН.Г.Д-1, ВШ-80-10-МН.Г.Д-2, ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 в соответствии со схемой расстановки тензорезисторов (см. рис. 2-4) представлены на рис. 8-10; они имеют выраженную упругую работу, о чем говорит совпадение графиков при каждой ступени нагружения образцов.

Оказалось, что в образцах ВШ-80-10-МН.Г.Д-1, ВШ-80-10-МН.Г.Д-2, ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 при увеличении шага расстановки тензорезисторов в продольном направлении значения напряжений в датчиках Т-1, Т-2 различаются незначительно. На этом основании можно сделать вывод, что минимальный шаг расстановки стеклопластиковых шайб в продольном направлении ( $S_1$ ) должен быть не менее  $3D_{ш}$ .

Для определения требуемой расстановки шайб в поперечном направлении ( $S_3$ ) на образец ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 был дополнительно установлен тензорезистор Т-3 (см. рис. 4). Распределение вертикальных напряжений в образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 в тензорезисторе Т-3 показано на рис. 11.

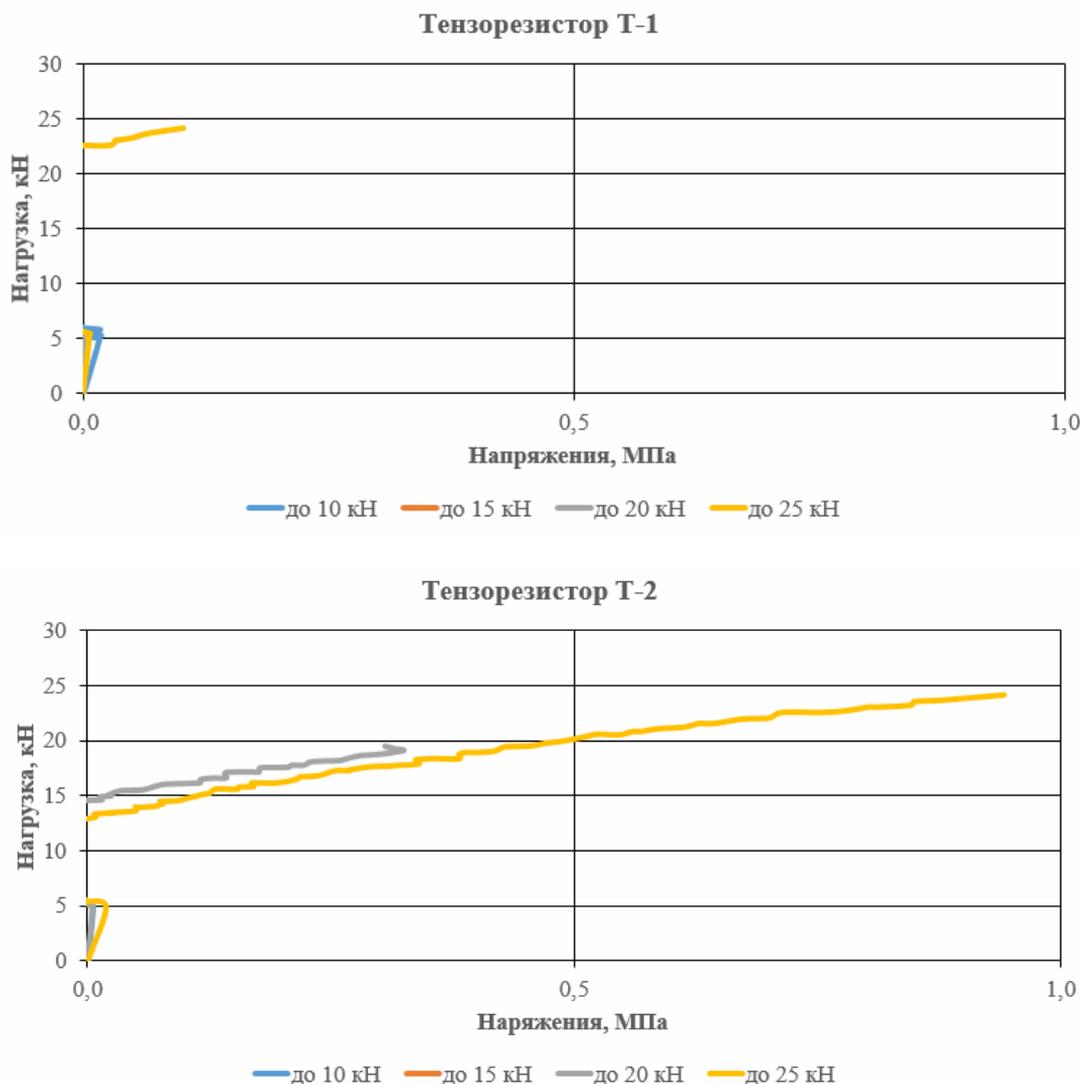


Рис. 8. Распределение вертикальных напряжений в образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-1

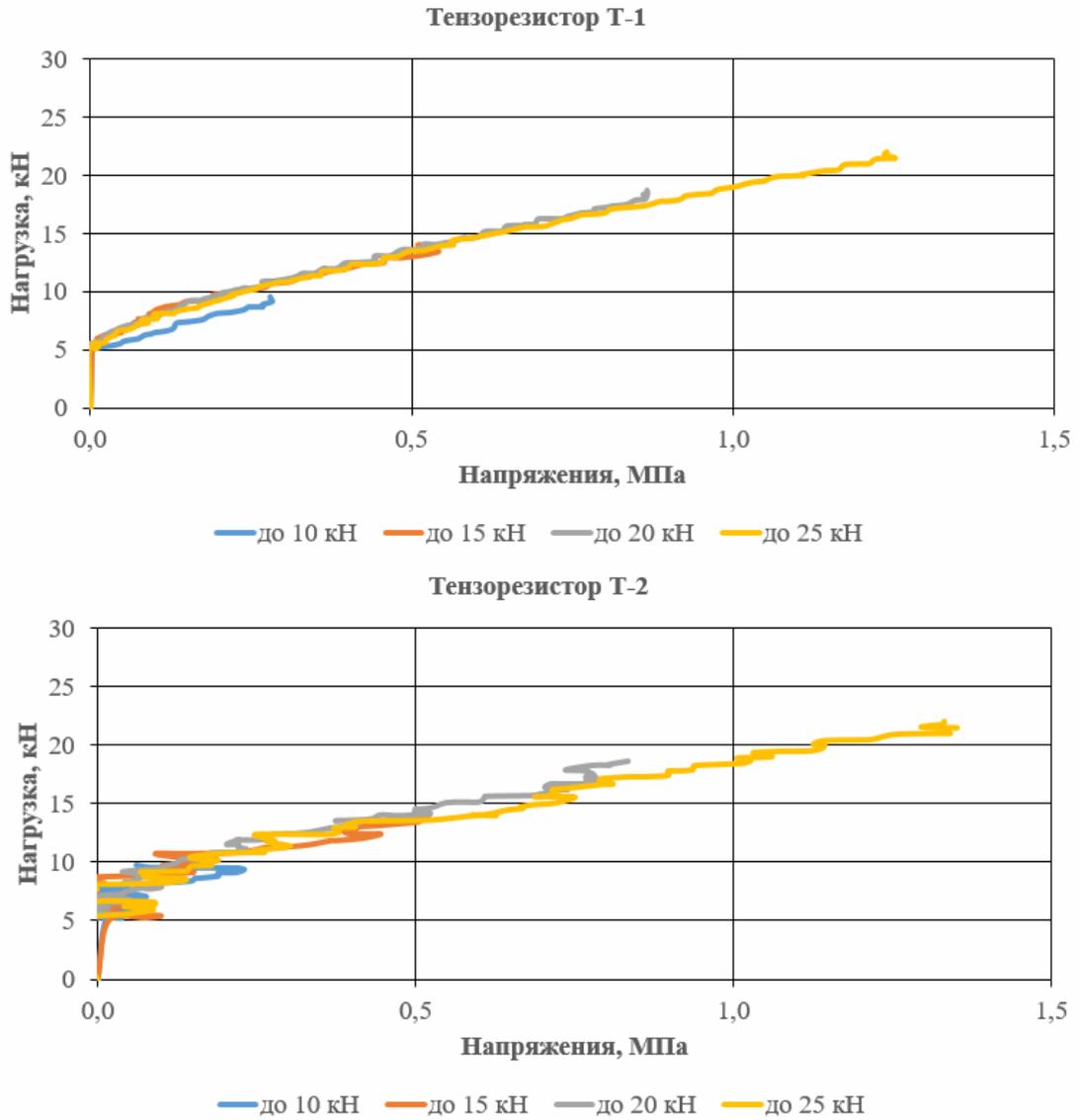


Рис. 9. Распределение вертикальных напряжений в образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-2

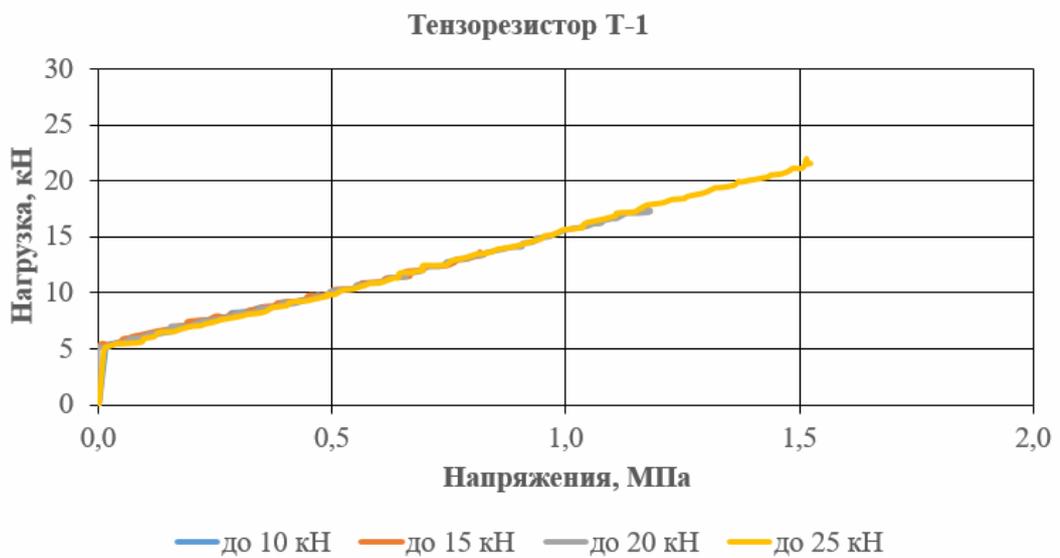


Рис. 10. Распределение вертикальных напряжений в образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 (начало)

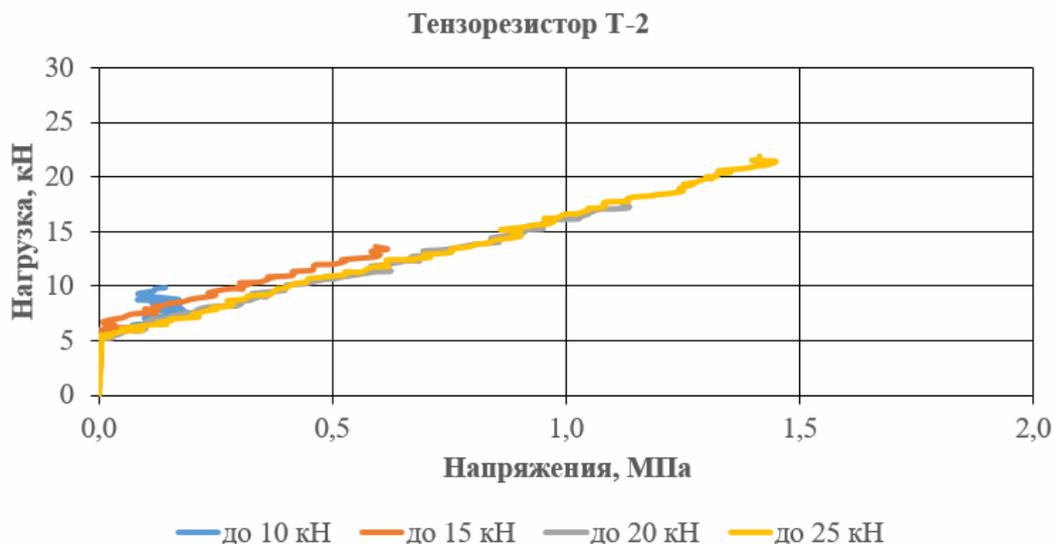


Рис. 10. Распределение вертикальных напряжений в образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 (окончание)

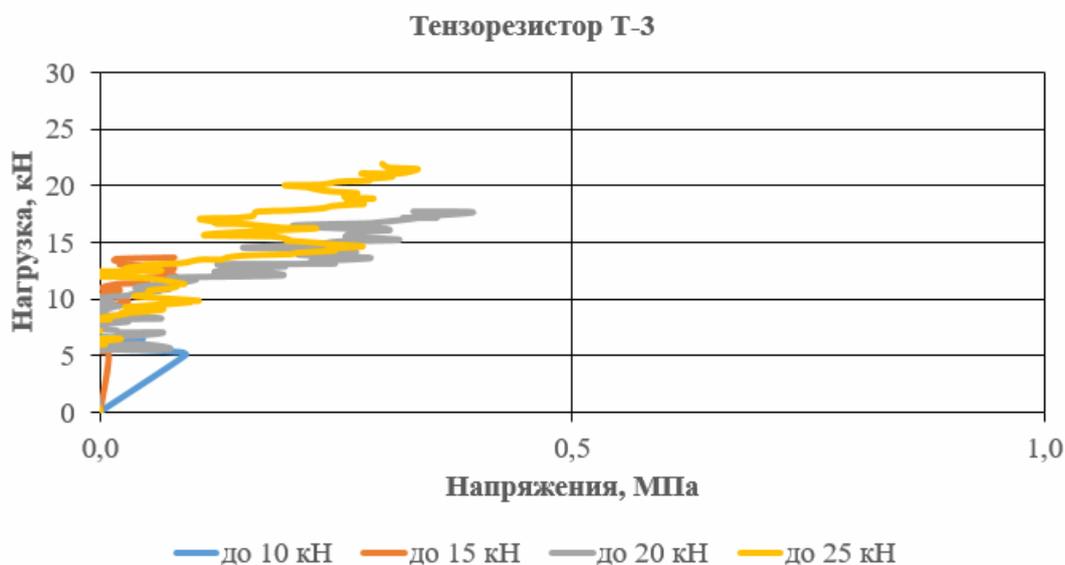


Рис. 11. Распределение вертикальных напряжений в образце ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 в тензорезисторе Т-3

Установлено, что график распределения вертикальных напряжений в тензорезисторе Т-3 образца ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 (см. рис. 11) имеет упругую работу при нагружении образца. В тензорезисторе Т-3 возникают незначительные напряжения, на основании чего можно сделать вывод, что минимальный шаг расстановки шайб в поперечном направлении ( $S_3$ ) должен быть не менее  $1D_{ш}$ .

### Выводы

1. Представлена методика определения параметров расстановки стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций.
2. Выполнены испытания образцов на клеенных стеклопластиковых шайбах при действии ступенчатой кратковременной нагрузки.
3. Установлены требуемые параметры расстановки стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций в продольном направлении ( $S_1$ ) не менее  $3D_{ш}$ , в поперечном ( $S_3$ ) – не менее  $1D_{ш}$ .

## Список литературы

1. Руднев, И.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2014. – №4. – С. 5–12.
2. Лисицкий, И.И. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – №4. – С. 9–15.
3. Вдовин, В.М. Клеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, М.С. Галахов. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 171 с.
4. Вдовин, В.М. Клеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
5. Ишмаева, Д.Д. Жесткие узлы клееных деревянных балочных элементов на клеенных стальных шайбах / Д.Д. Ишмаева, В.М. Вдовин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – №1. – С. 189–195.
6. Вдовин, В.М. Коррозионно-стойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций / В.М. Вдовин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4(41). – С. 103–108.
7. Арискин, М.В. Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2(51). – С. 96–103.

## References

1. Rudnev, I.V. Connections of wooden constructions elements with the use of the pasted steel plates / I.V. Rudnev, V.I. Zhadanov, S.V. Lisov // News of higher educational institutions. Construction. – Novosibirsk, 2014. – No4. – P. 5–12.
2. Lisitsky, I.I. Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods / I.I. Lisitsky, V.I. Zhadanov // Industrial and civil engineering. – 2020. – No4. – P. 9–15.
3. Vdovin, V.M. Ring dowel glued in timber structures joints / V.M. Vdovin, V.N. Karpov, M.S. Halachov. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2011. – 171 p.
4. Vdovin, V.M. Glued metal washers in the joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.
5. Ishmaeva, D.D. Rigid connections of glued wooden beam elements on glued steel washers / D.D. Ishmaeva, V.M. Vdovin // Bulletin of Orenburg State University. – 2014. – No1. – P. 189–195.
6. Vdovin, V.M. Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures / V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No4(41). – P. 103–108.
7. Ariskin M.V. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No2(51). – P. 96–103.

УДК 694.14

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_84

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

**Арискин Максим Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

**Ванин Илья Владимирович**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: ya.vanin94@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

**Ariskin Maksim Vasilievich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building Structures»  
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

**Vanin Ilya Vladimirovich**,  
Postgraduate of the department «Building  
Structures»  
E-mail: ya.vanin94@yandex.ru

## СОЕДИНЕНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАЛЬНЫХ ШАЙБАХ С ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБОЙ

М.В. Арискин, И.В. Ванин

Предложено соединение элементов деревянных конструкций с применением стальных шайб с внутренней резьбой. Рассмотрена технология изготовления соединений. Представлены результаты испытаний образцов. Показана достаточная несущая способность и высокая технологичность данного соединения.

*Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение на стальных шайбах с резьбой, методика исследований, технологичность, напряженно-деформированное состояние*

## CONNECTION OF WOODEN STRUCTURES ON STEEL WASHERS WITH INTERNAL THREAD

M.V. Ariskin, I.V. Vanin

The connection of elements of wooden structures with the use of steel washers with internal thread is proposed. The technology of manufacturing compounds is presented. The results of testing samples are given. Sufficient load-bearing capacity and high manufacturability of this compound are shown.

*Keywords: wooden structures, connection on steel washers with thread, research methodology, manufacturability, stress-strain state*

### Введение

Многие соединения деревянных конструкций изготавливаются путем вклеивания в деревянный элемент различных вкладышей, таких, как шпонки, шайбы, нагели, стержни и пластины. Одним из таких соединений является соединение деревянных конструкций с применением клеенных стальных шайб [1]. Использование клеевой композиции в данном соединении обеспечивает необходимую прочность и монолитность соединения, однако увеличивается срок изготовления конструкции. Кроме того, работа с клеящими составами требует определенных навыков, что снижает технологичность соединения.

Требования к соединениям включают в себя следующие критерии: простота изготовления соединительных элементов, простота и скорость сборки соединения, сборно-разборность, ремонтпригодность, унификация элементов. В большой степени данным критериям соответствует резьбовое соединение. Использование резьбового соединения вместо клеевого значительно повышает технологичность изготовления конструкции, что делает актуальным его применение в соединениях деревянных конструкций на круглых стальных шайбах.

## 1. Теоретические предпосылки исследования

Соединения деревянных конструкций с применением вклеенных стальных шайб изготавливаются с использованием клеевых композиций. Применение клеящих составов обеспечивает передачу усилий от шайбы на деревянный элемент как по торцам шайб, так и по склеенным поверхностям, что приводит к распределению внутренних напряжений по всему объему деревянного элемента, тем самым увеличивая несущую способность соединения.

Вместе с тем при изготовлении данного соединения особое внимание следует уделять составу клеевой композиции, пропорциям смешиваемых веществ, их сроку годности, особенностям хранения, адгезии материалов. Кроме того, время застывания клея составляет порядка 3–7 дней и значительно зависит от температуры и влажности окружающей среды. В совокупности вышеуказанные факторы значительно снижают технологичность данного соединения.

В свою очередь, резьбовое соединение довольно распространено как в машиностроении, так и в строительстве. Его изготовление технологично, сборка соединений не зависит от условий окружающей среды, оно обеспечивает жесткое соединение элементов, что указывает на возможность применения соединения деревянных конструкций на стальных шайбах с внутренней резьбой (ШР). Сборка соединения будет включать в себя выборку гнезд под шайбы и закручивание шайб на шпильке.

Предположительно в соединении ШР не будет распределения внутренних напряжений по всему объему деревянного элемента, что снизит его несущую способность. Однако при полном затяжении шайб возможно возникновение сил трения между шайбами и деревянным элементом. Также вследствие монолитного соединения спиральных поверхностей шайб и шпильки возможно дополнительное обжатие деревянного элемента из-за их совместных перемещений, что увеличит силы трения между элементами и повысит несущую способность соединения.

Для проверки данных предположений проведено экспериментальное исследование. Цель исследования – определить характер разрушения соединения и его напряженно-деформированное состояние (НДС).

Ниже представлены технология изготовления образцов с применением стальных шайб с внутренней резьбой, а также результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки.

## 2. Технология изготовления образцов

В целях исследования НДС соединения ШР отобраны 3 деревянных элемента размерами 200×150×50. Материалом для испытываемых образцов принята древесина сосны, влажность древесины принималась близкой к 12 %. Стальные круглые шайбы диаметром 80 мм и толщиной 10 мм и стальные шпильки диаметром 20 мм изготовлены из стали С255. На внутренние диаметры шайб наносится однозаходная резьба с помощью токарно-фрезерного оборудования. Гнезда под шайбы, а также отверстие под шпильку изготавливаются аналогично [2].



Рис. 1. Элементы испытываемых образцов



Рис. 2. Образец, готовый к испытанию

Далее шайбы вкладываются в гнезда таким образом, чтобы совпал заход резьбы на обеих шайбах. Затем образец помещается в П-образную раму, вкручивается шпилька, и полученная конструкция стягивается гайками. Перед тем как образец помещается в испытательную установку, к нему прикрепляются необходимые детали для размещения датчиков для определения деформаций. Образец, готовый к испытанию, показан на рис.2.

Всего в серии представлены 3 образца. Все образцы соответствующим образом промаркированы, их размеры приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры испытываемых образцов

Марка образца	Параметры деревянного элемента, мм			Параметры шайбы, мм	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	$D_{ш}$	$t_{ш}$
ШР-80-10-РМ-1	150	50	200	80	10
ШР 80-10-РМ-2					
ШР-80-10-РМ-3					

Схема маркировки образцов:

ШР-80-10-РМ-1,

где ШР – шайба с резьбовым соединением; 80 – диаметр шайбы, мм; 10 – толщина шайбы, мм; РМ – испытание образца, помещенного в П-образную металлическую раму; 1 – номер образца в серии.

### 3. Методика проведения эксперимента

Исследование проводилось при температуре 18–20 °С и относительной влажности воздуха 60–65 %. Испытательная установка состоит из силовой рамы, домкрата грузоподъемностью 20 тонн и устройства управления давлением с преобразующим блоком.

Нагрузка создается гидравлическим прессом и прикладывается в соответствии с заданным алгоритмом. Алгоритм проведения испытания состоит из 2-х этапов. На первом этапе происходит обжатие элементов испытываемого образца путем приложения нагрузки в 1 кН. Данная нагрузка выдерживается в течение 5 секунд и затем сбрасывается до 0. На втором этапе происходит ступенчатое нагружение образца до его разрушения. Величина каждой ступени составляет 1 кН. Каждая ступень выдерживается в течение 5 секунд, затем идет нагрузка следующей ступени. Ступени повторяются непрерывно до полного разрушения образца. Деформации образца (вертикальные перемещения) определяются с помощью датчика, подключенного к преобразующему блоку, и фиксируются в журнале испытания.

Схема приложения нагрузки изображена на рис. 4. Общий вид испытательной установки представлен на рис. 5.

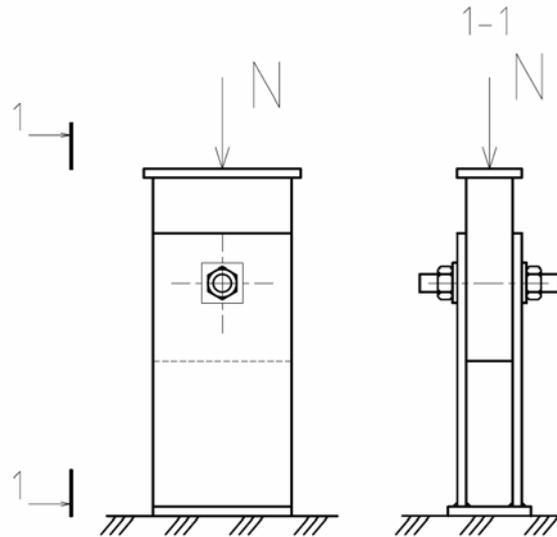
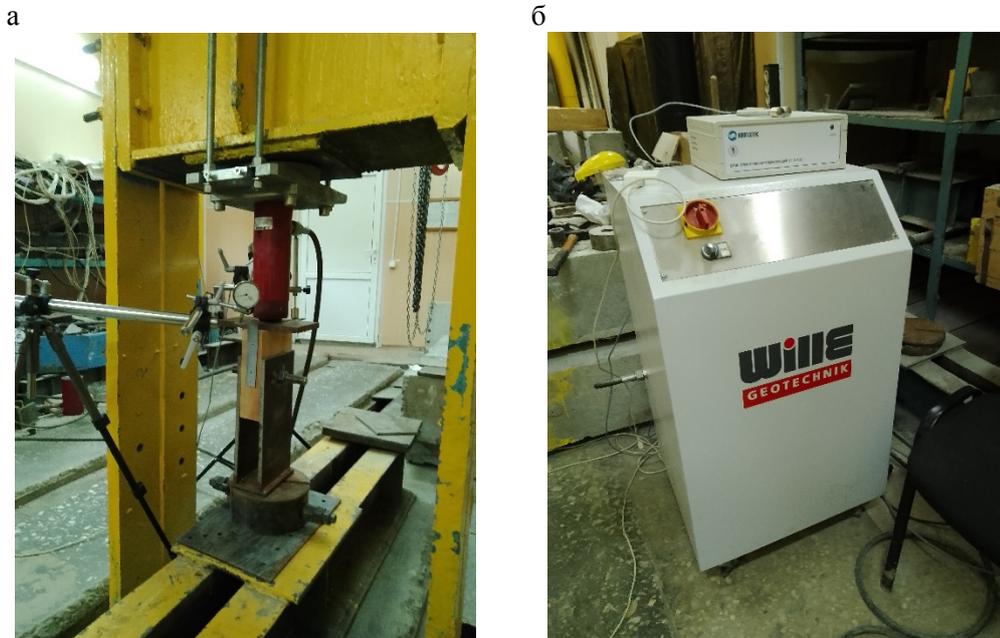


Рис. 4. Схема приложения нагрузки


 Рис. 5. Общий вид испытательной установки:  
 а – силовая рама с домкратом; б – устройство управления давлением с преобразующим блоком

#### 4. Результаты испытаний

Испытания проводились до полного разрушения образцов. За разрушающую нагрузку принималась та, при которой возникал значительный рост деформаций при постоянной нагрузке.

Результаты испытаний приведены в табл. 2. По результатам построены графики деформаций образцов. Графики изображены на рис. 6. Образцы после испытаний представлены на рис. 7.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки

Марка образца	Разрушающая нагрузка, кН	Предельные деформации образца, мм
ШР-80-10-РМ-1	50,71	8,11
ШР-80-10-РМ-2	35,26	11,91
ШР-80-10-РМ-3	46,8	4,03

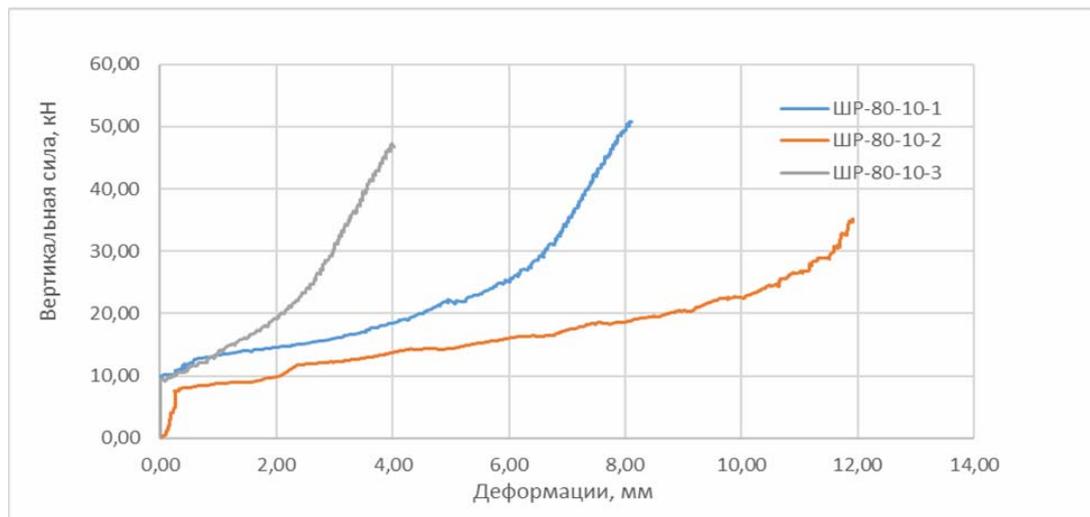


Рис. 6. Графики деформаций образцов

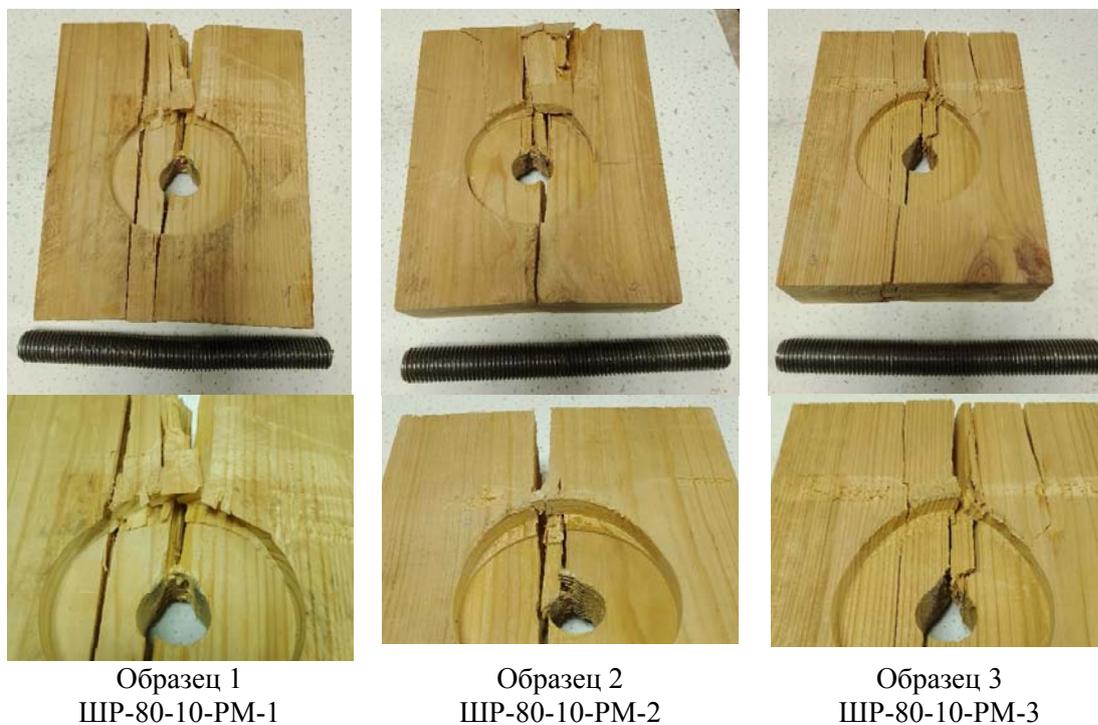


Рис. 7. Образцы после испытаний

Из графиков деформаций видно, что, несмотря на одинаковые параметры деревянных элементов и стальных шайб, характер разрушения образцов различается в каждом испытании. Различаются как разрушающие нагрузки, так и предельные деформации.

Рассмотрев образцы после разрушения, можно заметить, что во всех 3 образцах также различается и характер сдвига древесины непосредственно под торцами шайб. Это произошло в результате неполного затяжения шайб при помещении образца в П-образную раму, из-за чего между шайбой и деревянным элементом образовался небольшой зазор, выявить который в процессе испытания при полном стягивании образца гайками не представляется возможным. Наличие указанного зазора, отличающегося у каждого испытываемого образца, привело к тому, что усилия от торцов стальных шайб на деревянный элемент передавались по различным площадям, от чего характер разрушения образцов получился различным.

### Выводы

Экспериментальные исследования соединения ШР показали, что значительное влияние на НДС указанного соединения кроме параметров шайб будет оказывать также степень затяжения шайб, от которой будет зависеть площадь передачи усилий от шайб на деревянный элемент. Необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований с использованием конструктивных элементов, позволяющих контролировать степень затяжения шайб и наличие зазора между элементами образца (сборно-разборная П-образная рама, стальные накладки и т.п.). На целесообразность проведения дальнейших исследований рассматриваемого соединения указывают как технологичность соединения ШР (скорость сборки, простота изготовления, унификация элементов), так и удовлетворительная несущая способность.

### Список литературы

1. Вдовин, В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
2. Арискин, М.В. Напряженно-деформированное состояние соединений на вклеенных стеклопластиковых шайбах / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин, И.В. Ванин // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4(49). – С. 103–111.

### References

1. Vdovin, V.M. Glued metal washers in joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.
2. Ariskin, M.V. Stress-strain state of joints on glued fiberglass washers / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, I.V. Vanin // Regional architecture and construction. – 2021. – №4 (49). – P. 103–111.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.3: 628.4: 691.1

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_90

*Самарский государственный технический университет*

Россия, 443100, г. Самара,  
ул. Молодогвардейская, 244,  
тел.: (846)278-43-53; факс: (846) 278-44-00

**Чертес Константин Львович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Химическая технология  
и промышленная экология»  
E-mail: chertes2007@yandex.ru

**Пыстин Виталий Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Химическая технология  
и промышленная экология»  
E-mail: vitaliy.pystin@yandex.ru

**Тупицына Ольга Владимировна,**  
доктор технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Химическая технология  
и промышленная экология»  
E-mail: ecology@samgtu.ru

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

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

*Samara State Technical University*

Russia, 443100, Samara, 244  
Molodogvardeyskaya St.,  
tel.: (846)278-43-53; fax: (846) 278-44-00

**Chertes Konstantin L'vovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
Department «Chemical Technology and  
Industrial Ecology»  
E-mail: chertes2007@yandex.ru

**Pystin Vitaliy Nikolayevich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Chemical Technology  
and Industrial Ecology»  
E-mail: vitaliy.pystin@yandex.ru

**Tupitsyna Ol'ga Vladimirovna,**  
Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department «Chemical  
Technology and Industrial Ecology»  
E-mail: ecology@samgtu.ru

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

**Grishin Boris Mikhailovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
Department «Water Supply, Sewerage and  
Hydraulic Engineering»  
E-mail: bgrishin@rambler.ru

## ОБРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ СМЕСИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД И ТВЁРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

К.Л. Чертес, В.Н. Пыстин, О.В. Тупицына, Б.М. Гришин

Приведены экспериментальные данные по обезвоживанию осадков первичных отстойников и избыточного активного ила аэротенков в фильтрующих геотубах при их предварительном реагентном и безреагентном кондиционировании. Исследованы реологические характеристики упрочнённой смеси обезвоженных осадков сточных вод и свалочного грунта полигона твёрдых коммунальных отходов. Предложено перспективное направление по утилизации отходов, которое включает в себя упрочнение смеси обезвоженных осадков и свалочного грунта цементирующими добавками с последую-

щим использованием в качестве материалов для дорожного строительства. Представлено конструктивно-технологическое решение оформления комплекса по производству строительных материалов на основе обезвоженных осадков сточных вод и свалочных грунтов полигонов твёрдых коммунальных отходов.

*Ключевые слова: осадки сточных вод, твёрдые коммунальные отходы, обезвоживание, цементирующие добавки, производство строительных материалов*

## PROCESSING AND UTILIZATION OF A MIXTURE OF SEWAGE SLUDGE AND SOLID MUNICIPAL WASTE: PROMISING TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

K.L. Chertes, V. N. Pystin, O.V. Tupitsyna, B.M. Grishin

Experimental data on the dehydration of sewage sludge and excess activated sludge of aerotanks in filtering geotubes during their preliminary reagent and non-reagent conditioning are presented. The rheological characteristics of a reinforced mixture of the dehydrated sewage sludge and the landfill soil of the municipal solid waste landfill have been studied. A promising direction for waste disposal is proposed, which includes the strengthening of a mixture of dehydrated sewage sludge and landfill soil with mixing additives, followed by its use for materials of road construction. A constructive technological solution for the design of a complex for the production of building materials based on dehydrated sewage sludge and landfill soils of municipal solid waste landfills is presented.

*Keywords: sewage sludge, municipal solid waste, dehydration, cementing additives, production of building materials*

Из всего многообразия отходов коммунального сектора наиболее крупнотоннажными видами являются осадки сточных вод (ОСВ) и твердые коммунальные отходы (ТКО). Данные виды отходов в настоящее время направляют на размещение в накопители. Характерными типами накопителей являются иловые площадки и полигоны.

На иловых площадках осуществляют долговременное размещение осадков очистных сооружений, а на полигонах – захоронение ТКО и обезвоженных ОСВ. Большинство иловых площадок и полигонов, построенных без учета современных природоохранных требований, морально и физически устарело. Кроме того, полезная вместимость рабочих карт постепенно срабатывается. Без производства реабилитационных работ выведенные из эксплуатации иловые площадки и полигоны ТКО, а также и другие виды накопителей отходов превращаются в объекты накопленного экологического вреда (ОНЭВ).

Целью исследований, проведённых авторами, являлась разработка новых или адаптация существующих технологических решений по обработке накопленных в ОНЭВ отходов с последующим их использованием в качестве материалов для строительства или ремонта автодорог.

И ОСВ, и ТКО имеют определенное средство по структуре и составу. Так, оба вида отходов являются тугопластичными, водонасыщенными биоразлагаемыми материалами. Следует отметить, что природа обводнённости ОСВ и ТКО различна. Так, у осадков избыточная влажность объясняется неполным отделением воды при седиментации взвешенных веществ в первичных и вторичных отстойниках. Причинами повышения влажности ТКО выступают поступление в свалочный массив полигона атмосферных осадков, а также анаэробное разложение органики с образованием стехиометрической воды [1, 2].

Для минерализации и обезвоживания органической составляющей ТКО в процессе производства рекультивационных работ требуется строительство сооружений биотермического компостирования [3, 4]. При длительном хранении на полигонах биологическое разрушение ТКО сопровождается измельчением частиц материалов, и по своим характеристикам ТКО становятся похожими на грунты [5]. Поэтому для свалочных материалов ТКО со сроком хранения более 25 лет используются термины «грунтоподобный материал» или «свалочный грунт».

В отдельных случаях обезвоженные и минерализованные коммунальные отходы требуется упрочнить. Это вызвано необходимостью использования продуктов на основе осадков и разложившихся ТКО в качестве строительных материалов. Для упрочнения отходов коммунально-строительного сектора возможно применение материалов, обладающих вяжущими свойствами. В качестве сырьевой базы здесь можно использовать отходы цементной промышленности и тампонажа скважин.

В таблице представлены характеристики ОСВ и свалочных грунтов полигонов ТКО, в том числе и коммунальных, пригодных к использованию в качестве строительных материалов.

Отдельные характеристики отходов, пригодных после обработки в качестве сырья для производства строительных материалов

Показатели	Ед. изм.	Наименование отхода	
		ОСВ (ОПО и ИАИ)	Свалочные грунты полигонов ТКО
Влажность	%	50-90	20-80
Удельное сопротивление фильтрации (УСФ)	10-10 см/г	50-1000	600-2900
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	0,7-1,5	0,4-1,3
Преимущественный гранулометрический размер	мм	0,0001-0,001	0,001-0,005 1,0-100
CaO	%	8,9-36,7	15,4-26,7
MgO		1,4-3,4	0,3-2,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,3-16,9	3,4-8,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5,0-18,7	12,3-42,7
SiO <sub>2</sub>		15,2-49,6	20,4-37,8
Водородный показатель (рН)	ед.	6,5-7,5	4,5-10,5
Нефтепродукты	%	-	до 1,0
Содержание беззольного вещества	%	40-80	10-90
Органический углерод	% от массы сухого вещества	65-82	до 50
Азот общий		2,4-7,5	до 1
Общий фосфор		0,8-1,9	-
Общий калий		0,2-0,7	-
Общее микробное число (ОМЧ)	Кл/кг	до 1010	до 108

Примечание. ОПО и ИАИ – смесь осадков первичных отстойников и избыточных активных илов городских очистных сооружений с различным сроком хранения на иловых картах.

На первом этапе утилизации осадков и илов осуществляется их обезвоживание. Одним из наиболее эффективных приёмов обезвоживания ОПО и их смеси с ИАИ является выдерживание в геотубах (геоконтейнерах), выполненных из полимерной фильтрующей ткани. После закачивания ОПО в геотубы происходят «выдавливание» свободной влаги из осадка и её фильтрация через ткань геотуб под действием силы тяжести.

Зависимости динамики изменения влажности в образцах ОПО и их смеси с ИАИ были исследованы авторами в лабораторных условиях. Эксперименты проводились в лаборатории Научно-аналитического центра промышленной экологии Самарского ГТУ на пилотной установке, состоящей из четырёх модельных геоконтейнеров объёмом по 5 л каждый. В качестве фильтрующей оболочки для геоконтейнеров использовался тканый полипропилен толщиной 2 мм с размерами пор 375 мкм.

Исходная влажность образцов ОСВ (ОПО, а также их смеси с ИАИ) находилась в диапазоне 89,3–96,3 %, в зависимости от срока хранения на иловых площадках. Продолжительность обезвоживания образцов ОСВ в модельных контейнерах составляла до 45 суток. В ряде экспериментов перед обезвоживанием осадок обрабатывался раствором катионного флокулянта Praestol 85LTR молекулярной массой около  $9 \cdot 10^6$  с дозой 2 мг на 1 г сухого вещества осадка. В процессе обезвоживания осадков определялся эффект снижения влажности по формуле

$$\mathcal{E}_w = \frac{W_{\text{исх}} - W_{\text{к}}}{W_{\text{исх}}} \cdot 100\%,$$

где  $W_{\text{исх}}$  – исходная влажность ОСВ, %;  $W_{\text{к}}$  – конечная влажность ОСВ, %, после периода обезвоживания  $T$ , сут.

Графики изменения эффекта  $\mathcal{E}_w$  при геоконтейнерном обезвоживании образцов ОСВ показаны на рис. 1 и 2.

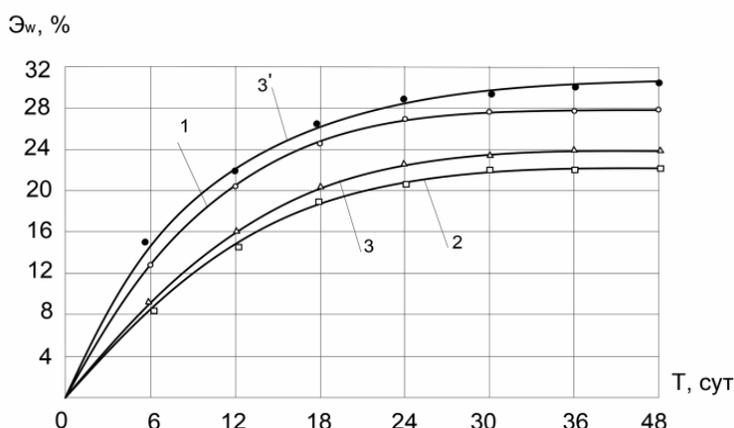


Рис. 1. Кинетика эффекта снижения влажности  $\mathcal{E}_w$  при геоконтейнерном обезвоживании ОСВ с различными сроками хранения на иловых площадках:

- 1 – смесь ОПО и ИАИ после 3 сезонов промораживания и последующего оттаивания,  $W_{\text{исх.}} = 94,3\%$ ; 2 – смесь ОПО и ИАИ сроком хранения менее 1 сезона (без промораживания),  $W_{\text{исх.}} = 95,2\%$ ; 3 – ОПО со сроком хранения менее 1 сезона  $W_{\text{исх.}} = 95,0\%$ ; 3' – то же с предварительной обработкой флокулянтom Praestol с дозой 2 мг/г

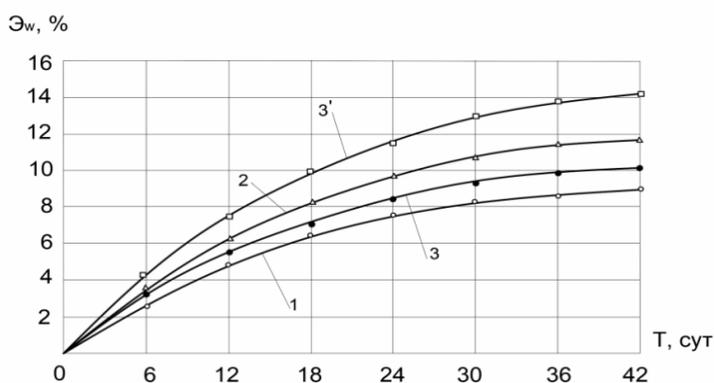


Рис. 2. Кинетика эффекта снижения влажности  $\mathcal{E}_w$  при геоконтейнерном обезвоживании ОСВ, сброженных в метантенках, с различными сроками хранения на иловых площадках:

- 1 – смесь ОПО и ИАИ со сроком хранения менее 1 сезона (без промораживания),  $W_{\text{исх.}} = 96,3\%$ ; 2 – смесь ОПО и ИАИ после 3 сезонов промораживания и последующего оттаивания,  $W_{\text{исх.}} = 94,8\%$ ; 3 – ОПО со сроком хранения менее 1 сезона (без промораживания),  $W_{\text{исх.}} = 95,6\%$ ; 3' – то же с предварительной обработкой флокулянтom Praestol с дозой 2 мг/г

Анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать вывод о том, что предварительное кондиционирование ОСВ реагентными (флокулирование) или безреагентными (замораживание с последующим оттаиванием) методами позволяет значительно улучшить эффект обезвоживания при одинаковом времени выдерживания образцов в геоконтейнерах.

Влажность предварительно обработанного флокулянта, не сброженного в метантенке ОПОВ после 42 суток обезвоживания в геоконтейнерах составляла порядка 65–65,5 %, а влажность смеси ОПО и ИАИ после 3 сезонов промораживания и оттаивания при 42-суточной выдержке в геоконтейнере была в пределах 67,5–68,2 %. Следует отметить, что влажность осадков и илов менее 72–75 % является оптимальной для осуществления процесса их последующего биотермического компостирования.

Осадки и илы, предварительно сброженные в метантенке, как следует из анализа графиков на рис. 2, даже после кондиционирования и геоконтейнерного обезвоживания имели влажность не менее 82 %, что требует их дополнительного обезвоживания.

Высокая влажность сброженных в метантенке илов и осадков после обезвоживания в геоконтейнерах объясняется тем, что обезвоживанием гравитационным фильтрованием из ОСВ можно удалить только свободную влагу. По Ю.В. Воронову, в сброженной смеси ОПО и ИАИ свободная влага наблюдается только при влажности  $W_{исх} > 90$  %; поэтому даже при длительном хранении на иловых площадках лишь небольшая часть коллоидно связанной влаги ОСВ, переходящей в свободную форму, может быть удалена с помощью неэнергоёмких методов обезвоживания. Эффективное обезвоживание сброженной смеси ОПО и ИАИ перед компостированием может быть осуществлено только на декантерных центрифугах или ленточных фильтрах-прессах с предварительной обработкой флокулянтам [1, 4].

Основное направление дальнейших исследований было связано с поиском рациональных технологических решений, позволяющих использовать обезвоженные ОСВ и их смеси со свалочным грунтом полигонов ТКО в качестве строительных материалов.

В качестве свалочного грунта были использованы ТКО полигона г. Тольятти после их длительного биологического разложения в течение 25-30 лет. Перед смешением с обезвоженными ОСВ свалочный грунт предварительно измельчался до фракций крупностью не более 0,01 мм.

Авторами был проведён ряд экспериментов по исследованию изменения прочностных характеристик смеси обезвоженных ОСВ и свалочного грунта в массовом соотношении 1:1, упроченной цементирующей добавкой. После смешения с цементом образцы подвергались естественной сушке в течение 12 суток. В течение указанного периода времени осуществлялись анализы образцов по показателям влажности, модуля деформации, угла внутреннего трения и сцепления. Результаты экспериментальных исследований по определению прочностных характеристик смеси ОСВ и ТКО с цементирующими добавками представлены на рис. 3 и 4.

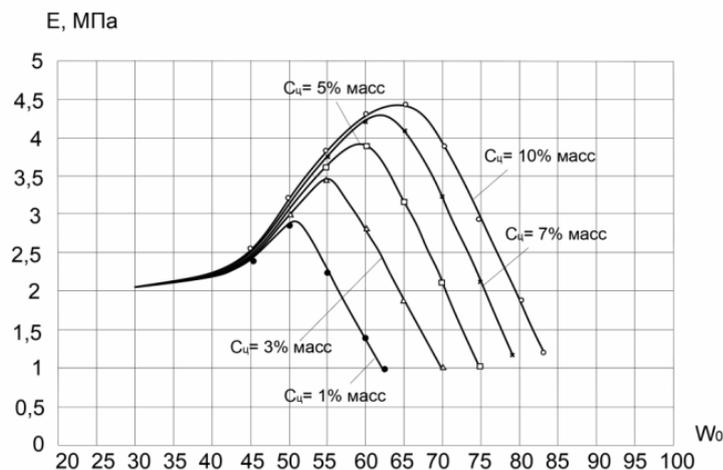


Рис. 3. Влияние массовой доли цементирующей добавки на величину модуля деформации  $E$  смеси ОСВ и свалочного грунта с различной исходной влажностью  $W_0$

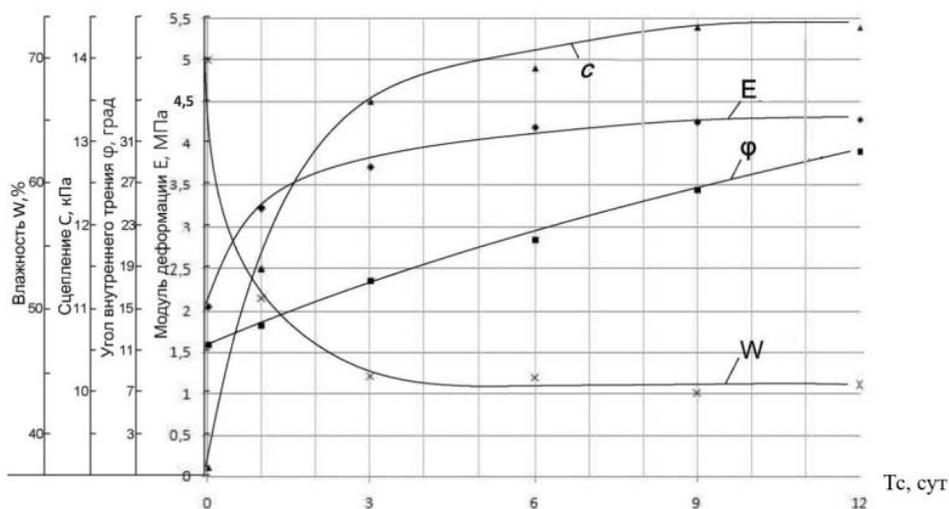


Рис. 4. Изменение прочностных характеристик смеси ОПО и свалочного грунта при внесении цементующей добавки с массовой долей  $C_{ц}=7\%$

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что при значениях массовой доли цементующей добавки  $C_{ц}$  от 5 до 10 % максимальные значения модуля деформации образцов находились в диапазоне исходной влажности 60-67 % для смеси ОСВ и ТКО (см. рис. 3). За период времени сушки в естественных условиях  $T_c=12$  сут влажность образцов снижалась с 68-70 до 42-43 % (см. рис. 4).

Показатели модуля деформации образцов  $E=3,8-4,3$  МПа, полученные при значениях  $C_{ц}=5-7\%$ , позволяют использовать упрочнённые цементацией смеси ОСВ и ТКО после их естественной сушки и дробления в качестве строительного щебня для ремонта автодорог, отсыпки откосов и вертикальной планировки выемок.

На основе проведённых исследований предложена схема утилизации ОСВ иловых площадок и свалочных грунтов полигонов ТКО, представленная на рис. 5. Кроме свалочных грунтов ТКО по данной схеме могут быть утилизированы органические отходы предприятий различных отраслей промышленности.

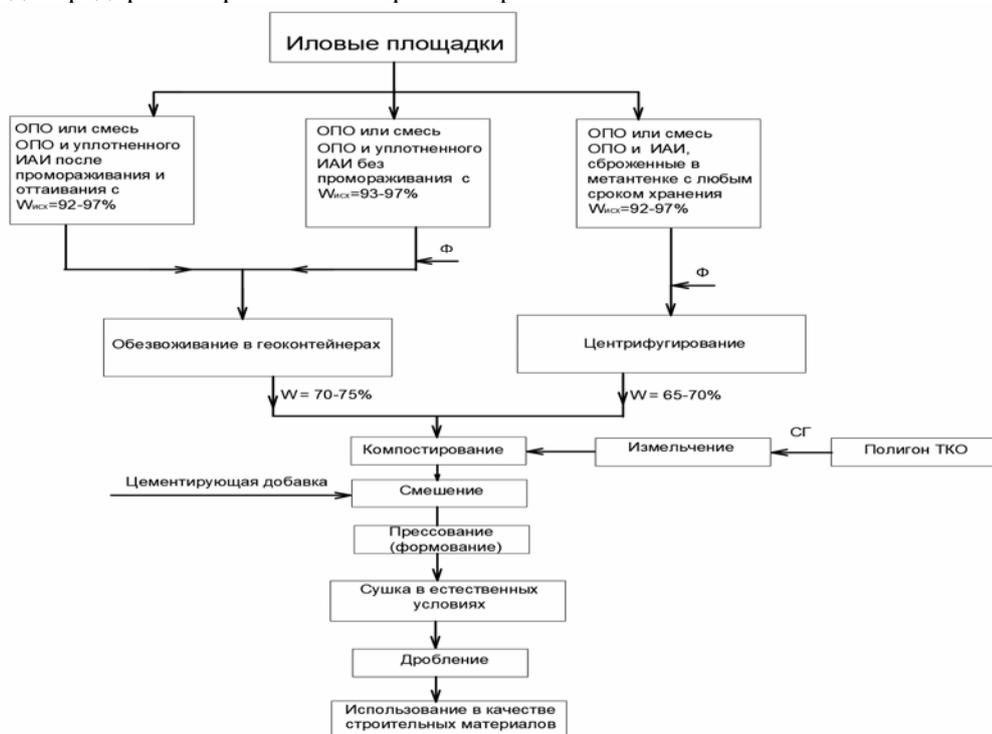


Рис. 5. Схема утилизации ОСВ и ТКО ОНЭВ:

Ф – флокулянт; СГ – свалочный грунт;  $W$  – влажность после обезвоживания

Предложенная схема была использована в проектах ликвидации ОНЭВ, сформированных выведенными из эксплуатации и потерявшими собственника объектами обращения с коммунальными и промышленными отходами Самарской области. На рис. 6 приведено проектное решение комплекса по производству строительных материалов, полученных из ОСВ, свалочных грунтов и вяжущих.

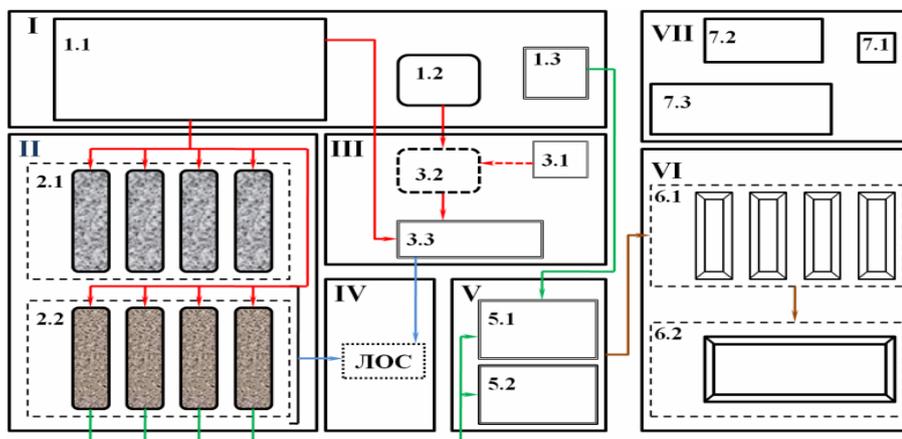


Рис. 6. Конструктивно-технологическое оформление комплекса по производству строительных материалов на основе ОСВ и свалочных грунтов полигонов ТКО:

I – зона промежуточного размещения пастообразных отходов; II – зона геоконтейнерной обработки жидких осадков; III – зона центрифугирования шламов; IV – зона сооружений локальной очистки иловой воды; V – зона приготовления шламо-цементной смеси; VI – зона упрочнения и временного хранения вторичных грунтов; VII – Административно-бытовая зона; 1.1 – карта временного хранения пастообразных отходов; 1.2 – резервуар временного накопления жидких осадков; 1.3 – склад некондиционного тампонажного цемента; 2.1 – геоконтейнеры в процессе фильтратовыделения; 2.2 – геоконтейнеры в процессе консолидации; 3.1 – реакгентное хозяйство; 3.2 – узел смешения ОСВ с кондиционирующими добавками; 3.3 – установка центрифугирования; 5.1 – участок перемешивания грейфером; 5.2 – стационарный смеситель; 6.1 – участок упрочнения осадкоцементной смеси; 6.2 – участок временного хранения готового продукта; 7.1 – КПП; 7.2 – АБК; 7.3 – площадка стоянки техники

Подобные решения позволяют одновременно ликвидировать ОНЭВ и создавать на их основе предприятия по производству вторичных материальных ресурсов из отходного сырья 4–5-го классов опасности, а именно из ОСВ и ТКО, обладающих структурным и биохимическим сродством.

#### Выводы

1. В зависимости от способов предварительной обработки осадков сточных вод определены области применения гравитационного фильтрования и механического обезвоживания шламов иловых площадок для их последующей утилизации.

2. Экспериментально определены оптимальные значения исходной влажности смеси обезвоженных осадков сточных вод со свалочным грунтом полигонов твердых коммунальных отходов, а также массовой доли цементирующей добавки при получении на их основе строительных материалов для ремонта автодорог, отсыпки откосов и вертикальной планировки выемок.

3. Предложена перспективная технологическая схема утилизации осадков сточных вод и твердых коммунальных отходов, использованная в проектах ликвидации объектов накопленного экологического вреда.

4. Разработанные проектно-технологические решения позволяют одновременно с ликвидацией объектов накопленного экологического вреда создавать предприятия по производству вторичных материальных ресурсов из шламов 4–5-го классов опасности.

1. Туровский, И.С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание / И.С. Туровский. – М.: Делта принт, 2008. – 376 с.
2. Чертес, К.Л. Размещение осадков сточных вод в толще полигона твердых бытовых отходов / К.Л. Чертес, Д.Е. Быков, А.М. Штеренберг, М.В. Назаров, О.В. Тупицына, Е.В. Михайлов // Экология и промышленность России. – 2009. – №1. – С. 39–41.
3. Жежеря, А.А. Использование площадок компостирования в составе многофункциональных комплексов обращения с отходами / А.А. Жежеря // Управление техносферой. – 2021. – Т.4, №2. – С.212–220.
4. Валиев, В.С. Способы утилизации осадков городских сточных вод (обзор) / В.С. Валиев, Д.В. Иванов, Р.Р. Шагидуллин // Российский журнал прикладной экологии. – 2020. – №4. – С. 52–63.
5. Офрихтер, В.Г. Оценка геотехнических характеристик ТБО полевыми методами / В.Г. Офрихтер, М.А. Безгодков, Я.В.Офрихтер // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2015. – № 3.– С. 58–65.

## References

1. Turovsky, I.S. Sewage sludge. Dehydration and disinfection / I.S. Turovsky. – M.: Delhi print, 2008.– 376 p.
2. Chertes, K.L. The Location of the sewage sludge in the thickness of the solid waste landfill / K.L. Chertes, D.E. Bykov, A.M. Shterenberg, M.V. Nazarov, O.V. Tupitsyna, E.V.Mikhailov // Ecology and industry of Russia. – 2009. – No. 1. – P. 39–41.
3. Zhezherya, A.A. The use of composting sites as part of multifunctional complexes for waste management / A.A. Zhezherya // Management of the technosphere. – 2021. – V.4. – No. 2. – P.212–220.
4. Valiev, V.S. Methods for the disposal of urban sewage sludge (review) / V.S. Valiev. D.V. Ivanov, R.R. Shagidullin // Russian Journal of Applied Ecology. – 2020. – No 4. – P. 52–63.
5. Ofrihter, V.G. Evaluation of geotechnical characteristics for solid municipal waste by field methods / V.G. Ofrihter, M.A. Bezgodov, Ya.V.Ofrihter // Academic Bulletin of UralNIIProekt RAABS. – 2015. – No 3. – P. 58–65.

*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

*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

*Пензенский государственный университет*

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

**Лебединский Константин Валерьевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Транспортные машины»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

*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

*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

*Penza State University*

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
тел.: (8412) 56-35-11;  
факс: (8421) 56-51-22

**Lebedinskiy Konstantin Valerevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Transport Machines»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЕСТРУКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

С.Ю. Андреев, В.А. Князев, К. В. Лебединский

Приведены результаты теоретического анализа технологических процессов деструктивной очистки производственных сточных вод, используемых на локальных очистных сооружениях промышленных предприятий. Установлено, что одной из наиболее распространенных новых окислительных технологий (НОТ) в последнее время является технология Фентона, предусматривающая использование смеси окислителя – пероксида водорода и катализатора – соли двухвалентного железа. Показано, что дополнительное введение в обрабатываемый объем сточных вод хлорноватистой кислоты в процессе Фентона позволит повысить скорость деградации органических загрязнений и проводить обработку в широком диапазоне уровня *pH* очищаемых сточных вод. Разработана новая технология деструктивной очистки производственных сточных вод, предусматривающая совместную реализацию катодных процессов электровосстановления кислорода воздуха до пероксида водорода и анодных процессов электросинтеза хлорноватистой кислоты, одновременно протекающих в камерах мембранного электролизера, позволяющая значительно сократить продолжительность процесса деструктивной очистки сточных вод и снизить эксплуатационные затраты на его проведение.

*Ключевые слова:* окислительные технологии, процесс Фентона, пероксид водорода, гидроксид-радикал, электровосстановление кислорода, хлорноватистая кислота

## NEW TECHNOLOGY OF DESTRUCTIVE TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER

S.Yu. Andreev, V.A. Knyazev, K.V. Lebedinsky

The results of the theoretical analysis of technological processes of destructive treatment of industrial wastewater used at local treatment facilities of industrial enterprises are presented. It has

been established that one of the most common new oxidizing technologies (NOT) in recent years is the Fenton technology, which involves the use of a mixture of an oxidizer – hydrogen peroxide and a catalyst – a salt of ferrous iron. It is shown that the additional introduction of hypochlorous acid into the treated volume of wastewater in the Fenton process will increase the rate of degradation of organic pollutants and carry out treatment in a wide range of pH levels of treated wastewater. A new technology of destructive treatment of industrial wastewater has been developed, which provides for the joint implementation of cathodic processes of electrical recovery of air oxygen to hydrogen peroxide and anodic processes of electrosynthesis of hypochlorous acid simultaneously occurring in the chambers of a membrane electrolyzer, which significantly reduces the duration of the destructive wastewater treatment process and reduces the operating costs of its implementation.

*Keywords: oxidizing technologies, Fenton process, hydrogen peroxide, hydroxide radical, electric oxygen recovery, hypochlorous acid*

В настоящее время для очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод широкое распространение получили методы биохимического окисления органических загрязнений.

Традиционные технологии не всегда показывают достаточную эффективность в процессах очистки производственных сточных вод, содержащих в своем составе загрязняющие вещества, токсичные для микроорганизмов активного ила, и биопленки, не подлежащие биодegradации.

В этих случаях для конверсии изначально стойких органических загрязнений в более подверженные биодegradации вещества целесообразно использовать для предварительной обработки сточных вод новые окислительные технологии (НОТ).

Инновационные технологические схемы химической очистки производственных сточных вод, содержащих в своем составе трудноокисляемые загрязнения, позволяют реализовать ряд новых окислительных технологий (НОТ) (англ. Advanced oxidation process, AOP), к которым относятся:

1. Гомогенные и гетерогенные каталитические процессы.
2. Ферратная и персульфатная технологии.
3. Процессы электрохимического восстановления и окисления загрязняющих веществ.
4. Каталитическое озонирование.
5. Различные варианты процесса Фентона.

Тема новых окислительных технологий широко представлена в отечественной и зарубежной периодической научно-технической литературе, публикуемой в последнее время [1, 2].

Технологии НОТ обеспечивают глубокую дegradацию и минерализацию органических загрязнений сточных вод при их взаимодействии с гидроксильными радикалами, озоном, пероксидом водорода, персульфатами и ферратами.

Основную роль в химических процессах дegradации трудноокисляемых органических загрязнений сточных вод играют гидроксильные радикалы  $\text{OH}^\circ$ , имеющие высокий окислительный потенциал.

В таблице представлены величины окислительных потенциалов реагентов-окислителей, используемых в технологических процессах очистки сточных вод.

Окислительные потенциалы реагентов-окислителей, используемых в технологических процессах очистки сточных вод

№ п/п	Окислитель	Окислительный потенциал, В	Окислительный потенциал от потенциала озона, В %
1	Гидроксильные радикалы ( $\text{OH}^\circ$ )	2,7	130
2	Феррат натрия ( $\text{NaFeO}_4$ )	2,2	106
3	Озон ( $\text{O}_3$ )	2,07	100
4	Пероксид водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )	1,78	86
5	Перманганат калия ( $\text{KMnO}_4$ )	1,70	82
6	Хлорноватистая кислота ( $\text{HClO}$ )	1,49	72
7	Гипохлорит натрия ( $\text{NaClO}$ )	1,36	66

Как следует из данных таблицы, окислительный потенциал гидроксильных радикалов  $E_{\text{OH}} = +2,7 \text{ В}$  существенно превосходит величину этого показателя для озона ( $E_{\text{O}_3} = +2,07 \text{ В}$ ) – наиболее активного реагента-окислителя, получившего широкое распространение в практике деструктивной очистки сточных вод.

Озон, пероксид водорода и феррат-ионы могут непосредственно вступать в химические реакции, приводящие к минерализации органических загрязнений сточных вод, или участвовать в трансформациях, в результате которых образуются и другие высокоактивные промежуточные химические соединения.

Наибольшее распространение в практике деструктивной очистки производственных сточных вод, содержащих трудно окисляемые органические соединения, в настоящее время получил процесс Фентона.

Впервые как технология очистки производственных сточных вод в промышленном масштабе процесс Фентона был использован еще в 1960 году [3].

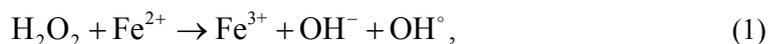
В настоящее время он остается одним из наиболее популярных видов НОТ-технологий, поскольку позволяет осуществить глубокую деградацию трудно окисляемых органических загрязнений при их содержании в сточных водах в значительных концентрациях.

Процесс Фентона основан на использовании смеси окислителя (пероксида водорода) и катализатора (соли двухвалентного железа), являющейся высокоактивным реагентом-окислителем. Наряду с озоном и кислородом пероксид водорода, входящий в состав реактива Фентона, является экологически чистым окислителем, образующим при восстановлении кислород и воду.

В работе [3] представлен аналитический обзор опубликованных в литературе экспериментальных данных, который позволил авторам классифицировать механизм диспропорционирования молекул пероксида водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  аква-ионами двухвалентного железа  $\text{Fe}^{+2}$ , протекающий в процессе Фентона как циклический ион-радикальный процесс, и опровергнуть ранее выдвигавшуюся гипотезу о радикально-цепном механизме реакции.

Экспериментальные доказательства образования высокоактивных гидроксильных радикалов  $\text{OH}^\circ$  в процессе диспропорционирования молекул пероксида водорода при участии аквакомплексов ионов двухвалентного железа основываются на анализе продуктов окисления органических загрязнений, а также на результатах прямой регистрации спектров ЭПР [4].

Поведение системы Фентона в настоящее время принято описывать как совокупность циклического протекания следующих стадий [3]:



При протекании процесса Фентона образуются реакционноспособные гидроксильные  $\text{OH}^\circ$  и супероксидные  $\text{O}_2^{\circ-}$  радикалы, обладающие высокой окислительной активностью.

Оптимальным считается отношение концентрации молекул пероксида водорода  $[\text{H}_2\text{O}_2]$  и ионов двухвалентного железа  $[\text{Fe}^{+2}]$  в реактиве Фентона

$$0,5 \leq \frac{[\text{H}_2\text{O}_2]}{[\text{Fe}^{+2}]} \leq 200. \quad (3)$$

При величине отношения (3) более 200 протекает преимущественно реакция (1) и в обрабатываемых сточных водах наблюдается быстрое накопление ионов трехвалентного железа  $\text{Fe}^{+3}$ .

Основными факторами, определяющими эффективность процесса Фентона, являются уровень pH обрабатываемых сточных вод, а также исходное содержание в них органических загрязнений и сопутствующих ионов.

Оптимальным считается уровень pH обрабатываемых сточных вод от 2,8 до 4,0.

При повышении уровня pH более 4,0 происходит окисление ионов двухвалентного железа  $Fe^{+2}$  и образование комплексных соединений с гидроксил-ионами. Повышение уровня pH также обуславливает снижение окислительной активности пероксида водорода.

Процесс образования высокоактивных гидроксильных радикалов при дозировании в сточные воды реактива Фентона протекает с низкой скоростью. По технологии Фентона в обрабатываемые сточные воды постоянно в течение длительного времени добавляют пероксид водорода, водный раствор соли двухвалентного железа и кислоту (рис. 1).

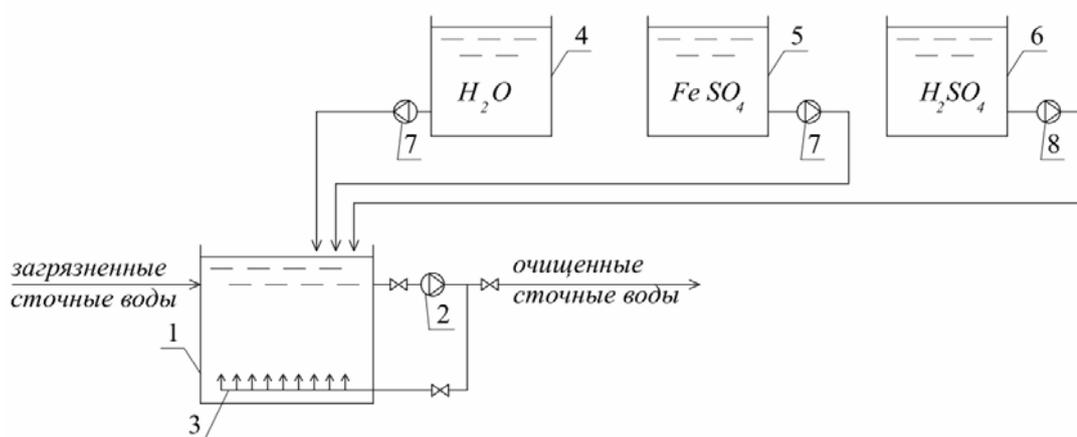


Рис. 1. Технологическая схема процесса Фентона:

1 – реактор; 2 – рециркуляционный насос; 3 – распределительная система рециркуляционного потока; 4 – расходный бак пероксида водорода; 5 – расходный бак раствора соли железа; 6 – расходный бак кислоты; 7, 8 – насос-дозатор

Перемешивание объема реактора осуществляется рециркуляционным потоком очищаемых сточных вод, перекачиваемых насосом.

Для проведения процесса Фентона требуется постоянная корректировка уровня pH обрабатываемых сточных вод и повышенный расход пероксида водорода – реагента, имеющего высокую стоимость, что заметно увеличивает эксплуатационные расходы.

Существенно снизить расход пероксида водорода и отказаться от корректировки уровня pH обрабатываемых сточных вод можно за счет использования дополнительных химических реагентов.

В работе [5] приводятся сведения о том, что дополнительное введение в обрабатываемый объем в процессе Фентона гидроксиламина  $NH_2OH$  позволяет существенно повысить скорость деградации органических загрязнений и проводить обработку в широком диапазоне pH.

В соответствии с ГОСТ 12.1-007-76 гидроксиламин является токсичным веществом четвертого класса опасности, что ограничивает возможность его использования для интенсификации процесса Фентона.

Сотрудниками Пензенского государственного университета архитектуры и строительства была разработана новая технологическая схема деструктивной очистки производственных сточных вод, содержащих трудно окисляемые органические соединения, предусматривающая возможность интенсификации циклического ион-радикального процесса диспропорционирования пероксида водорода, протекающего с образованием реакционноспособных гидроксильных радикалов и супероксидных ион-радикалов, за счет дополнительного введения в обрабатываемый объем хлорноватистой кислоты.

Технологическая схема деструктивной очистки производственных сточных вод, предусматривающая дополнительное введение в обрабатываемый объем хлорноватистой кислоты, представлена на рис. 2.

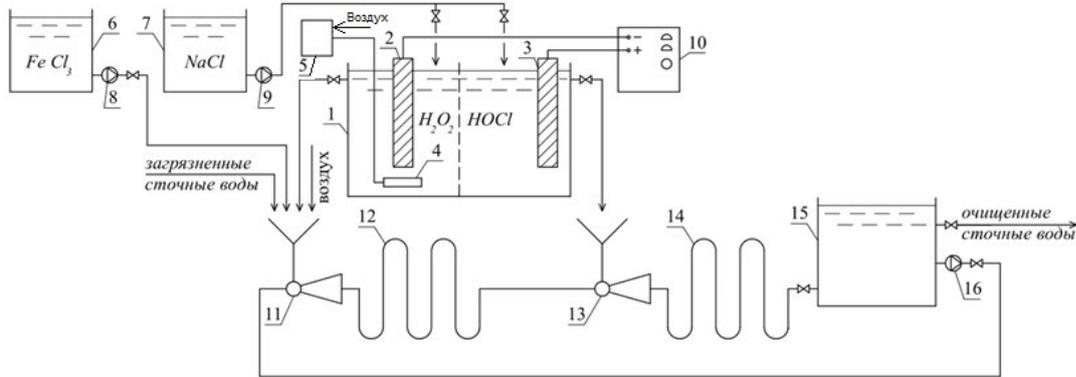
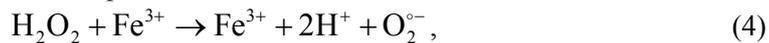


Рис. 2. Технологическая схема деструктивной очистки производственных сточных вод, предусматривающая дополнительное введение в обрабатываемый объем хлорноватистой кислоты:

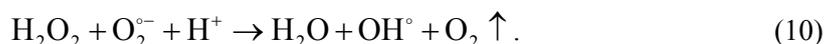
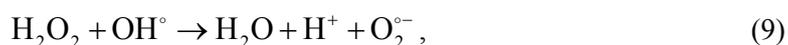
- 1 – мембранный электролизер; 2 – катод; 3 – анод; 4 – барботер; 5 – компрессор; 6 – расходный бак хлорида железа; 7 – расходный бак хлорида натрия; 8, 9 – насосы-дозаторы; 10 – выпрямительное устройство; 11, 13 – эжектор; 12, 14 – трубчатые смесители; 15 – бак-реактор; 16 – насос

В соответствии с предложенной технологической схемой деструктивная очистка производственных сточных вод проводится в две стадии.

На первой стадии деструктивной очистки производственных сточных вод осуществляется циклический ион-радикальный процесс диспропорционирования пероксида водорода. Обрабатываемые сточные воды забираются из бака-реактора 15 рециркуляционным насосом 16 и под напором подаются в эжектор 11. Во всасывающий патрубок эжектора 11 подаются загрязненные сточные воды, водный раствор соли трехвалентного железа (хлорид железа) и раствор пероксида водорода, нарабатываемый в катодной камере мембранного электролизера 1. В трубчатом смесительном устройстве 12 происходит циклический процесс диспропорционирования пероксида водорода под действием аквакомплексов ионов трехвалентного железа:



Из трубчатого смесительного устройства 12 обрабатываемые сточные воды под остаточным напором поступают в эжектор 13, во всасывающий патрубок которого подается хлорноватистая кислота, нарабатываемая в анодной камере мембранного электролизера 1. Из эжектора 13 сточные воды поступают в трубчатое смесительное устройство 14, где осуществляется вторая стадия деструктивной очистки. На второй стадии деструктивной очистки производственных сточных вод циклический ион-радикальный процесс диспропорционирования пероксида водорода интенсифицируется под действием хлорноватистой кислоты в результате протекания следующих химических реакций:



В соответствии с предложенной схемой деструктивной очистки производственных сточных вод процесс электрохимического синтеза пероксида водорода и хлорноватистой кислоты предлагается проводить в катодной и анодной камерах мембранного электролизера 1.

Использование технологического приема совместной реализации катодных процессов электрохимического синтеза пероксида водорода и анодных процессов электрохимического синтеза хлорноватистой кислоты, одновременно протекающих в камерах мембранного электролизера с нерастворимыми электродами, позволит значительно снизить эксплуатационные затраты на процесс деструктивной очистки производственных сточных вод.

Пероксид водорода не получил широкого распространения в нашей стране как реагент-окислитель в технологических процессах очистки производственных сточных вод в связи с высокой его стоимостью.

Значительно снизить себестоимость процессов деструктивной очистки сточных вод может позволить технология электрохимического синтеза разбавленных растворов пероксида водорода, протекающего в результате реакции катодного восстановления кислорода воздуха. В связи с этим значительный интерес представляет возможность использования технологии электрохимического синтеза разбавленного раствора пероксида водорода непосредственно на месте его использования на локальных канализационных очистных сооружениях промышленного предприятия.

Процесс электровосстановления кислорода воздуха до пероксида водорода происходит в результате последовательного протекания следующих катодных реакций:



В статье Селюкова А.В. «Очистка сточных вод пероксидом водорода, синтезируемым электрохимическим путем», опубликованной в сборнике научных трудов ВНИИ ВОДГЕО за 1990 год, приводятся результаты промышленного внедрения технологии электрохимического синтеза раствора пероксида водорода на станции локальной очистки сточных вод от сероводорода производительностью 80 м<sup>3</sup>/сут бальнеолечебницы санатория «ШКЛО» в Львовской области.

В соответствии с описываемой в статье схемой очистки сточных вод на безнапорном мембранном электролизере генерировался разбавленный раствор пероксида водорода с рабочей концентрацией  $C_{\text{H}_2\text{O}_2} = 1,50 - 1,55$  г/л. Величина коэффициента выхода по току пероксида водорода составляла  $K_b = 0,8$ . Удельный расход электроэнергии на процесс электросинтеза пероксида водорода не превышал значения  $W_{\text{уд}} = 28$  кВт·ч/кг H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Имеющийся положительный опыт практического внедрения технологии электрохимического синтеза разбавленных растворов пероксида водорода позволяет сделать вывод о перспективности ее использования на локальных очистных сооружениях промышленных предприятий.

В соответствии с технологической схемой деструктивной очистки производственных сточных вод, изображенной на рис. 2, при подаче в анодную камеру электролизера 1 водного раствора хлорида натрия в анодной камере будут протекать следующие химические реакции:



В результате сопряжения анодных и катодных процессов в мембранном электролизере 1 в процессе электрохимического синтеза 1 кг пероксида водорода в катодной камере одновременно в анодной камере будет нарабатываться 3,5 кг хлорноватистой кислоты. Полученные в результате электрохимического синтеза в мембранном электролизере 1 реагенты подаются во всасывающие патрубки эжекторов 11, 13 и используются в процессе деструктивной очистки сточных вод.

Приведенный теоретический анализ методов деструктивной очистки производственных сточных вод, предусматривающих использование новых высокоактивных реагентов-окислителей, показал, что:

– обработка производственных сточных вод реактивом Фентона, представляющим собой смесь окислителя – пероксида водорода и катализатора – соли двухвалентного железа, позволяет осуществить глубокую деградацию трудно окисляемых органических загрязнений за счет выделения гидроксильных радикалов  $\text{OH}^\circ$ , обладающих высокой окислительной способностью;

– процесс Фентона требует постоянной корректировки pH обрабатываемых сточных вод, поддержания его значения на оптимальном уровне  $\text{pH} = 2,8-4,0$  и характеризуется низкой скоростью окисления органических загрязнений;

– дополнительное введение в обрабатываемый объем сточных вод в процессе Фентона хлорноватистой кислоты позволяет существенно повысить скорость химического окисления органических загрязнений и проводить обработку сточных вод в широком диапазоне pH;

– технология получения разбавленного раствора окислителя методом электровосстановления кислорода воздуха до пероксида водорода непосредственно на месте его использования на локальных канализационных очистных сооружениях промышленного предприятия позволит существенно снизить эксплуатационные затраты на процесс деструктивной очистки сточных вод;

– использование технологического приема совместной реализации катодных процессов электрохимического синтеза пероксида водорода и анодных процессов синтеза хлорноватистой кислоты, одновременно протекающих в камерах мембранного электролизера с нерастворимыми электродами, позволит сократить затраты промышленного предприятия на закупку реагентов-окислителей.

#### Список литературы

1. Ковалева, О.В. Технология и экологическая безопасность гальванотехники / О.В. Ковалева. – Кишинев: Издательство Молдавского гос. университет, 2008. – 370 с.
2. Stasinakis, A.S. Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – A mini review / A.S. Stasinakis // Global NEST Journal. – 2008. – 10(3). – P. 376–385.
3. Сычев, А.Я. Гомогенный катализ соединениями железа / А.Я. Сычев, В.Г. Исак. – Кишинев: Штиинца, 2000. – 216 с.
4. Метелица, Д.И. Механизмы гидроксирования ароматических соединений / Д. И. Метелица // Успехи химии. 2000. – Т.40, вып.7. – С. 1175–1210.
5. Chen, I. Strong enhancement on fenton oxidation by addition of hydroxylamine to accelerate the ferric and ferrous cycles / I. Chen, J. Ma, J. Zhang // Environmental Science and Technology. – 2011. – 45 (9). – P. 3925–3930.

#### References

1. Kovaleva, O.V. Technology and environmental safety of electroplating / O.V. Kovaleva. – Chisinau: Publishing House of the Moldavian State University, 2008 – 370 p.
2. Stasinakis, A.S. Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – A mini review / A.S. Stasinakis // Global NEST Journal. – 2008. – 10(3). – P. 376–385.
3. Sychev, A.Ya. Homogeneous catalysis by iron compounds / A.Ya. Sychev, V.G. Isak. – Chisinau: Stiinza, 2000. – 216 p.
4. Metelitsa, D.I. Mechanisms of hydroxylation of aromatic compounds / D.I. Metelitsa // Advances in chemistry. – 2000. – Vol.40, Issue 7. – P. 1175–1210.
5. Chen, I. Strong enhancement on fenton oxidation by addition of hydroxylamine to accelerate the ferric and ferrous cycles / I. Chen, J. Ma, J. Zhang // Environmental Science and Technology. – 2011. – 45 (9). – P. 3925–3930.

УДК 544.773

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_105

*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, г. Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 36-82-09

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

*Penza State University*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,  
tel.: (8412) 36-82-09

**Mishina Svetlana Ivanovna,**  
Candidate of Chemical Sciences, Associate  
Professor of the Department «Chemistry and  
Theory and Methodology Teaching  
Chemistry»  
E-mail: elancv@mail.ru

## УЛЬТРАЗВУК В ИЗМЕНЕНИИ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ОРГАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина

Ультразвуковая обработка является эффективным средством микродиспергирования и размола частиц в жидкой среде. В частности, при изготовлении сверхтонких суспензий волновое воздействие имеет множество преимуществ над обычным измельчающим оборудованием. Данный процесс повышает электропроводность исходных разбавленных суспензий и формирует центры кристаллизации, которые способствуют росту кристаллов с определенным размером. Показано, что обработка ультразвуком различных по химической природе суспензий (кремнезема и глины) приводит к дальнейшему формированию частиц, различающихся степенью гидрофобизации при взаимодействии с катионным ПАВ – гексиламином и анионным – децилсульфатом натрия. При этом краевой угол смачивания ( $\theta$ ) поверхности аэросила катионным поверхностно-активным веществом составлял  $23,6^{\circ}$  и превышал в 1,6 раза значения, полученные при гидрофобизации обработанной ультразвуком суспензии глины. Обработка суспензий кремнезема ультразвуком и дальнейшее добавление длинноцепочечного ПАВ децилсульфата натрия также обеспечивали более высокую (по сравнению с гексиламином) гидрофобизацию поверхности твердой фазы.

*Ключевые слова: твердые частицы, ультразвук, поверхностно-активные вещества, модификация поверхности, краевой угол*

## INFLUENCE OF ULTRASOUND ON THE CHANGE IN THE WETTING ANGLE OF ORGANICALLY MODIFIED PARTICLES

N.G. Vilkova, S.I. Mishina

Ultrasonic processing is an effective means of microdispersing and grinding particles in a liquid medium. In particular, ultrasonication has many advantages over conventional milling equipment in the manufacture of ultra-fine suspensions. This process increases the electrical conductivity of the initial dilute suspensions and forms crystallization centers that promote the growth of crystals with a certain size. It has been established that sonication of suspensions of various chemical nature (silica and clay) leads to the further formation of particles differing in the degree of hydrophobization when interacting with cationic surfactant-hexylamine. In this case, the contact angle ( $\theta$ ) of the aerosil surface with the indicated surfactant was  $23.6^{\circ}$  and exceeded by 1.6 times the values obtained by

hydrophobization of the clay suspension treated with ultrasound. The treatment of silica suspensions with ultrasound and the further addition of a long-chain surfactant, sodium decyl sulfate, also provided a higher (compared to hexylamine) hydrophobization of the solid phase surface.

*Keywords: solid particles, ultrasound, surfactants, surface modification, contact angle*

Ультразвуковые технологии нашли применение в медицине, пищевой промышленности, строительной промышленности, сельском хозяйстве и в быту. Это обусловлено возможностью переноса в материальных средах огромных энергий, воздействующих на молекулярном уровне на свойства материалов. Известно, что ультразвуковые воздействия успешно используются для вторичной переработки полимерных отходов. В этом случае вязкость и размер частиц дисперсной фазы, входящих в состав смеси полимеров, можно регулировать с помощью воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимеров. При этом ультразвуковое воздействие сопровождается разрывом химических связей макромолекул и снижением молекулярной массы полимеров, что может способствовать улучшению совместимости материалов при их совместной переработке.

Ультразвуковая обработка является эффективным средством микродиспергирования и размолла частиц в жидкой среде. В частности, при изготовлении сверхтонких глинистых суспензий ультразвуковая обработка имеет множество преимуществ над обычным измельчающим оборудованием. Эффективность ультразвуковой обработки растворов строительных материалов показана в монографии [1]. Данный процесс повышал электропроводность исходных разбавленных суспензий и формировал центры кристаллизации, которые способствовали росту кристаллов с определенным размером. Результатом подобных воздействий является повышение прочности полученных материалов.

Воздействия ультразвука можно охарактеризовать следующими изменениями структуры:

- уменьшением средней величины зерна;
- изменением характера распределения фаз;
- повышением однородности материала;
- равномерным распределением включений по объему слитка (в металлургии).

Известно, что количественными характеристиками процесса являются: теплота смачивания, краевой угол смачивания ( $\theta$ ), работа адгезии ( $W_a$ ):

$$W_a = \sigma_{жг} + \sigma_{тг} - \sigma_{тж}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{жг}$ ,  $\sigma_{тг}$ ,  $\sigma_{тж}$  – межфазные поверхностные натяжения на границах раздела жидкость – газ, твердая поверхность – газ и твердая поверхность – жидкость.

При этом условием растекания (смачивания) поверхности является  $\sigma_{тг} > \sigma_{тж}$ .

В случае, когда  $\sigma_{тг} < \sigma_{тж}$ , снижение энергии системы приводит к самопроизвольному уменьшению площади контакта капли с твердой поверхностью, то есть к стягиванию капли (несмачивание).

Количественной характеристикой смачивания является также краевой угол, который определяется как угол между твердой поверхностью и касательной в точке соприкосновения трех фаз, отсчитываемый в сторону жидкой фазы. Так как поверхностное натяжение можно рассматривать как энергию, приходящуюся на единицу площади, или как силу, действующую на единицу длины, то составляющие поверхностной энергии можно выразить с помощью векторов сил, действующих по периметру капли. В этом случае косинус краевого угла определяют, используя математическое выражение закона Юнга.

Методы регулирования смачивания основаны на изменении удельных поверхностных энергий на границе раздела твердое тело – газ, твердое тело – жидкость, а также поверхностного натяжения на границе раздела жидкость – газ. Физическими методами управления смачиванием являются электрические и магнитные поля, изменение температуры, обработка поверхности твердых тел ионизирующими излучениями. Наиболее универсальный метод – химический, который основан на использовании

поверхностно-активных веществ (ПАВ). Причем в качестве химического фактора, влияющего на изменение краевого угла смачивания, в основном выступают поверхностно-активные вещества (ПАВ) различной природы, а также их участие в процессах адсорбции и хемосорбции. Гидрофобизация частиц твердой фазы, ее влияние на свойства образующихся трехфазных пен, а также возможности их применения в различных отраслях промышленности, пищевой индустрии рассмотрены в ранее проведенных исследованиях [2-8]. Изменение свободной энергии межфазных поверхностей при взаимодействии с ПАВ дает возможность регулирования смачивания твердых тел жидкостями. Таким образом, различные пути такого регулирования сводятся к эффектам адсорбционного модифицирования поверхностей – их лиофилизации или лиофобизации за счет ориентированной адсорбции молекул ПАВ на межфазных границах раздела. Известно, что процесс адсорбции идет в сторону выравнивания полярностей фаз и тем сильнее, чем больше первоначальная разность полярностей. Если при адсорбции молекулы ПАВ ориентируются полярными группами к поверхности, а неполярными – от нее, то происходит гидрофилизация поверхности. При обратной ориентации молекул ПАВ наблюдается гидрофобизация поверхности.

В качестве физических факторов, влияющих на смачивание, выступают температура, поля различной природы.

Воздействие температуры на смачивание сильно зависит от природы сил взаимодействия между твердым телом и жидкостью. При химическом взаимодействии ПАВ с поверхностью краевые углы могут очень сильно изменяться в зависимости от температуры, причем в ряде случаев обнаруживается порог смачивания – температура, при достижении которой происходит резкое изменение краевых углов и работы адгезии. Известно, что обычно нагревание способствует улучшению физического смачивания, но известны и такие случаи, когда изменение температуры не оказывало какого-либо влияния на краевые углы. Например, при контакте жидких предельных углеводородов с тефлоном краевые углы во всем изученном интервале температур оставались постоянными.

После прохождения через магнитное поле с достаточно большой напряженностью вода значительно хуже смачивает многие твердые тела.

Влияние концентрации электролита на изменение краевых углов рассмотрено в [9]. В указанной работе использовали кремнезем (LudoxHS-40 и А-380), в качестве электролита – хлорид натрия, а в качестве ПАВ – гексилламин. Показано, что повышение концентрации используемого ПАВ в присутствии электролита приводит к повышению значений краевых углов оттекания воды в среднем на 5-10 градусов. Данное явление, возможно, обусловлено большей агрегацией гидрофобизованных частиц в присутствии электролита и их дальнейшим расположением и взаимодействием на границе раздела фаз. Для исследования влияния коагуляции на изменение краевого угла смачивания гидрофобизованных частиц кремнезема водой в указанной работе изучена их агрегация методом седиментации. Повышение концентрации гидрофобизатора при неизменной концентрации электролита всегда приводило к росту краевого угла смачивания. Величина краевого угла увеличивалась при добавлении электролита только при малой степени гидрофобизации.

Целью данной работы является анализ ультразвукового влияния на изменение краевого угла смачивания органомодифицированных частиц кремнезема и глины.

#### *Материалы и методы исследования*

При выполнении исследования ультразвукового влияния на изменение краевого угла смачивания были использованы следующее оборудование и материалы:

- весы аналитические типа АДВ-200М;
- ультразвуковой технологический аппарат «Волна» модель УЗТА-0,4/22-ОМ.

#### *Твердые частицы:*

– диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ , 99,9 % кремнезем марки Аэросил-380, А-380) – бесцветные кристаллы с молярной массой 60,084 г/моль, обладающие высокой прочностью. А-380 – высокодисперсный, высокоактивный, аморфный порошок с удельной поверхностью, равной 380 м<sup>2</sup>/г. Глина (белая косметическая глина «Крымская» марки

Фитокосметик). Глина данной марки содержит: глинозем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – 30 %, кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) – 47 % и 14 % воды. Также в глине присутствуют Mg, Ca, Zn, Ag и другие компоненты.

*Поверхностно-активные вещества:*

– гексилламин ( $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NH}_2$ , Нех, 99 % марки Merck) – органическое основание, катионный ПАВ, хорошо растворимый в воде, с молярной массой 101 г/моль и плотностью 0,766 г/см<sup>3</sup>;

– децилсульфат натрия или лаурилсульфат натрия ( $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{O-SO}_3\text{Na}$ , ДСNa, LSS, 99 % додецилсульфат марки Merck) – это синтетическая органическая натриевая соль лаурилсерной кислоты, анионный ПАВ, хорошо растворимый в воде, с критической концентрацией мицеллообразования, равной 7,6 мМ. Хлорид натрия ( $\text{NaCl}$  марки Merck).

Фотографии сформированных пузырьков в разных по составу суспензиях переносят на компьютер и подвергают дальнейшей обработке [10, 11].

Для характеристики относительной степени гидрофобизации твердой поверхности глины использовали степень относительной гидрофобизации  $n_g$ , ммоль/г [10]. В табл. 1 представлены результаты измерения краевого угла без добавок электролита при ультразвуковой обработке суспензии глины, модифицированной гексилламином, в течение определенного времени ( $\tau$ ).

Т а б л и ц а 1

Результаты измерения краевого угла смачивания глины, модифицированной гексилламином, без добавок электролита

Состав обрабатываемой суспензии	$C_{\text{пав}}$ , ммоль/л	Массовое содержание глины, %	Время обработки, мин	$n_g$ , ммоль/г	$\Theta^0$
20 мл глины + 0,03 мл Нех	15	1	10	1,5	12,00
20 мл глины + 0,06 мл Нех	30	1	10	3	17,9
20 мл глины + 0,1 мл Нех	50	1	10	5	20,82
20 мл глины + 0,03 мл Нех	15	1	20	1,5	19,9
20 мл глины + 0,06 мл Нех	30	1	20	3	21,7
20 мл глины + 0,1 мл Нех	60	1	20	5	28,84

Как видно из табл. 1, после 10-минутной обработки ультразвуком добавление гексилламина в количестве 15 и 50 ммоль/л ( $n_g = 1,5$  и 5) изменяло краевой угол смачивания от 12 до 20,82 градуса. При увеличении времени обработки до 20 мин и такой же относительной степени гидрофобизации поверхности краевой угол изменялся от 19,9 до 28,84 градуса. То есть увеличение времени обработки ультразвуком идентичных по составу суспензий приводило к росту краевого угла смачивания. Отметим, что даже при высоких концентрациях гексилламина ( $C_{\text{пав}} = 60$  ммоль/л) частицы глины оставались гидрофильными, а краевой угол смачивания не превышал 30°.

Результаты, полученные при обработке суспензии кремнезема (Аэросил-380), модифицированной гексилламином, представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Изменение краевого угла смачивания кремнезема, модифицированного гексилламином, без добавок электролита

Состав обрабатываемой смеси	$C_{\text{гекс}}$ , ммоль/л	Массовое содержание кремнезема, %	Время обработки, мин	$n_g$ , ммоль/г	$\Theta^0$
20 мл А-380 + 0,03 мл Нех	25,3	2	5	1,27	22,62
20 мл А-380 + 0,06 мл Нех	45,5	2	5	2,28	23,60
20 мл А-380 + 0,06 мл Нех	45,5	2	15	2,28	25,27

Как видно из табл. 2, краевой угол смачивания поверхности аэросила при добавлении катионного ПАВ ( $n_g=2,28$  ммоль/г,  $\tau=5$  мин) составлял  $23,6^\circ$  и превышал значения  $\theta$ , полученные ранее при обработке ультразвуком суспензии глины со степенью гидрофобизации  $n_g=1,5-3$  ммоль/г в течение 10 минут.

В табл. 3 представлены результаты измерения краевого угла без добавок электролита при ультразвуковой обработке суспензии кремнезема Аэросил-380, модифицированной длинноцепочечным анионным ПАВ- ДСNa.

Т а б л и ц а 3

Результаты измерения краевого угла смачивания 2 % кремнезема Аэросил-380, модифицированного децилсульфатом натрия, без добавок электролита

Состав обрабатываемой смеси	$C_{ДСNa}$ , ммоль/л	Массовое содержание кремнезема, %	Время обработки, мин	$n_g$ , ммоль/г	$\theta^\circ$
10 мл А-380 + 10 мл ДСNa	30	2	10	1,5	31,8
10 мл А-380 + 10 мл ДСNa	40	2	10	2	39,1
10 мл А-380 + 10 мл ДСNa	100	2	10	5	41,09

Как видно из табл. 3, добавки длинноцепочечного ПАВ к обработанной в течение 10 минут суспензии аэросила повышали значения краевого угла смачивания частиц до  $39,1^\circ$ . Отметим, что краевой угол составлял  $25,27^\circ$  при добавлении катионного ПАВ – гексилamina – к обработанной ультразвуком суспензии в течение 5-15 минут.

Заклучение:

1) обработка ультразвуком различных по химической природе суспензий (кремнезема и глины) приводит в дальнейшем к формированию частиц различной степени гидрофобизации при взаимодействии с катионным ПАВ гексилaminом. При этом краевой угол смачивания поверхности аэросила указанным поверхностно-активным веществом составлял  $23,6^\circ$  и превышал в 1,6 раза значения  $\theta$ , полученные при гидрофобизации обработанной ультразвуком суспензии глины;

2) обработка суспензий кремнезема ультразвуком и дальнейшее добавление длинноцепочечного ПАВ децилсульфата натрия повышают значения краевого угла смачивания частиц до  $39,1^\circ$ , обеспечивая более высокую (по сравнению с гексилaminом) гидрофобизацию поверхности твердой фазы.

#### Список литературы

1. Фокин, Г.А. Ультразвук в строительстве / Г.А. Фокин, А.С. Гуськов, Н.Г. Вилкова. – Пенза: ПГУАС, 2017. – 317 с.
2. Gonzenbach, U. T. Stabilization of foams with inorganic colloidal particles / U.T. Gonzenbach, R. R. Studart, E. Tervoort, L. J. Gauker // Langmuir. – 2006. – Vol. 22. – P. 10983-10988.
3. Dickinson, E. Food emulsions and foams: Stabilization by particles / E. Dickinson // Current Opinion in Colloid and Interface Sci. – 2010. – Vol. 15. – P. 40–49.
4. 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.
5. Vilkova, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // Mendeleev Communication. – 2011. – Vol. 21. – N 6. – P. 344–345.
6. 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 // Mendeleev Communication. – 2012. – Vol. 22. – N 4. – P. 227–228.

7. Нуштаева, А.В. Гидрофобизация частиц кремнезема различными катионными поверхностно-активными веществами / А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2021. – Т.63, № 3. – С. 22–29.

8. Vilkova, N.G. The Effect of Organic Liquids on the Stability of the Films and Foams Stabilized by Surfactants of Various Types / N.G. Vilkova, S.I. Mishina // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2019. – Vol. 10 (1). – P. 1896–1902.

9. Вилкова, Н.Г. Влияние электролита на снижение межфазного натяжения и изменение краевого угла смачивания / Н.Г. Вилкова, А.В. Нуштаева, Л.С. Горбунова // Известия вузов. Поволжский регион. – 2014. – №1. – С. 52–59.

10. Нуштаева, А.В. Стабилизация пен и эмульсий нерастворимыми порошками / А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова, С.И. Еланёва. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 132 с.

11. Кругляков, П.М. Физическая и коллоидная химия / П.М. Кругляков, А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова, Н.В. Кошева. – СПб.: Лань, 2022. – 208 с.

### References

1. Fokin, G.A. Ultrasound in construction / G.A. Fokin, A.S. Guskov, N.G. Vilkova. – Penza: PGUAS, 2017. – 317 p.

2. Gonzenbach, U. T. Stabilization of foams with inorganic colloidal particles / U.T. Gonzenbach, R. R. Studart, E. Tervoort, L. J. Gauker // Langmuir. – 2006. – Vol. 22. – P. 10983-10988.

3. Dickinson, E. Food emulsions and foams: Stabilization by particles / E. Dickinson // Current Opinion in Colloid and Interface Sci. – 2010. – Vol. 15. – P. 40–49.

4. 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.

5. Vilkova, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // Mendeleev Communication. – 2011. – Vol. 21. – N 6. – P. 344–345.

6. 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 // Mendeleev Communication. – 2012. – Vol. 22. – N 4. – P. 227–228.

7. Nushtaeva, A.V. Hydrophobization of silica particles with various cationic surfactants / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova // News of universities. Chemistry and chemical technology. – 2021. – Vol.63, N 3. – P. 22-29.

8. Vilkova, N.G. The Effect of Organic Liquids on the Stability of the Films and Foams Stabilized by Surfactants of Various Types / N.G. Vilkova, S.I. Mishina // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2019. – Vol.10 (1). – P. 1896–1902.

9. Vilkova, N.G. The effect of electrolyte on the reduction of interfacial tension and the change in the contact angle of wetting / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva, L.S. Gorbunova // Izvestiya vuzov. Volga region. – 2014. – N 1. – P. 52–59.

10. Nushtaeva, A.V. Stabilization of foams and emulsions with insoluble powders / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova, S.I. Elaneva. – Penza: PGUAS, 2011. – 132 p.

11. Kruglyakov, P.M. Physical and colloidal chemistry / P.M. Kruglyakov, A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova, N.V. Kosheva. – St. Petersburg: Lan, 2022. – 208 p.

УДК 528.4

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_111

*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

**Акифьев Илья Владимирович,**  
кандидат экономических наук, доцент  
кафедры «Землеустройство и геодезия»  
E-mail: zig@pguas.ru

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

*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 36-82-09

**Пономарева Инна Константиновна,**  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Информационное  
обеспечение управления и производства»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Akifev Ilya Vladimirovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Land Management and  
Geodesy»  
E-mail: zig@pguas.ru

**Eremkin Aleksander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

*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 «Information Support  
Management and Production»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ПРИНЦИПАХ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

И.В. Акифьев, А.И. Ерёмкин, И.К. Пономарева

В современной строительной отрасли требуется высокая точность определения координат земельных участков объектов строительства. Однако существующие геодезические технологии не позволяют решить данную задачу. Актуальность предлагаемых исследований обусловлена тем, что наметился переход от применения собственной базовой станции на пункте Государственной геодезической сети (ГГС) к определению координат от сети референционных станций. Но сеть референционных станций развита неравномерно, в настоящее время отсутствуют единая политика развития региональных сетей референционных станций, единая методика испытаний аппаратно-программного комплекса спутниковых сетей точного позиционирования и процедура утверждения их типа (сертификация), что существенно тормозит продвижение данной технологии по стране. В данной статье представлены результаты исследования современной наземной инфраструктуры навигационной системы ГЛОНАСС, определены её возможности для целей строительства зданий и сооружений и использования земельных территорий.

*Ключевые слова: геодезические работы в строительстве, спутниковые технологии, ГЛОНАСС, GPS, глобальная навигационная система, использование земельных участков под строительство*

## INNOVATIVE METHOD FOR PERFORMING GEODETIC WORKS IN CONSTRUCTION ON THE PRINCIPLES OF THE GLONASS NAVIGATION SYSTEM

I.V. Akifev, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva

In the modern construction industry high accuracy in determining the location of the coordinates of land plots of construction objects is required. However, the use of existing geodetic technologies

does not allow solving this problem. The relevance of the proposed research is due to the fact that there is a trend to transition from using your own base station at the point of the State Geodetic Network (GGS) to determining coordinates from a network of reference stations. The network of reference stations is developed unevenly throughout the country, at present there is no unified policy for the development of regional networks of reference stations, a unified methodology for testing the hardware and software complex of precision positioning satellite networks and a type approval procedure (certification), which significantly slows down the promotion of this technology across the country. This article presents studies of the modern ground infrastructure of the GLONASS navigation system and determines its capabilities for the construction of buildings and structures and the use of land areas.

*Keywords: geodetic works in construction, satellite technologies, GLONASS, GPS, global navigation system, use of land plots for construction*

В настоящее время в геодезии, кадастре, при возведении зданий и сооружений и использовании земельных участков под строительство активно применяются спутниковые методы позиционирования, в регионах создаются и развиваются сети референчных станций, измерения производятся в различных режимах: в режиме статики и быстрой статики, в режиме реального времени (метод RTK).

Геодезические работы в строительстве и при определении границ земельных участков должны выполняться с высокой геометрической точностью, особенно при возведении многоэтажных и высотных зданий; при выносе проектных координат спутниковыми приемниками следует учитывать возможные ошибки спутниковых измерений, алгоритмы их устранения или минимизации. Нередко из-за низкой точности определения координат происходит нарушение границ участков.

Наземную инфраструктуру систем точного позиционирования составляют постоянно действующие базовые (референчные) станции, которые в общем случае состоят из следующих элементов: спутникового приемника, антенны, оборудования связи (роутера и т.д.), метеодатчика, источника бесперебойного питания, коммуникационного шкафа.



Рис. 1. Структура базовой станции для определения координат объектов строительства и границ земельных участков

В практике выполнения геодезических, топографических и картографических работ основными спутниковыми системами, относительно которых определяют координаты характерных точек земельного участка, являются системы GPS и ГЛОНАСС. Для

решения поставленной задачи проводился анализ навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, которые применяются в России и включают в себя:

- космический сегмент, состоящий из орбитальной группировки космических аппаратов;

- сегмент контроля и управления орбитальной группировкой;

- сегмент пользователей, состоящий из наземной аппаратуры пользователей.

Сегмент контроля и управления орбитальной группировкой образуют следующие элементы: главная станция с вычислительным центром, станции слежения за автономными спутниками и станции загрузки данных на борт космического аппарата.

Известно, что главная станция системы GPS расположена в Колорадо-Спрингс (база ВВС), наземные станции – на острове Диего-Гарсия, острове Вознесения, атолле Кваджалейн и Гавайских островах; точное время определяют соответствующие службы точного времени по данным обсерватории, расположенной в Вашингтоне.

Сегмент контроля и управления орбитальной группировкой осуществляет сбор данных по орбитам спутников, выполняет вычисление приближенных координат спутников (рабочих эфемерид) и загружает полученные данные на борт спутников.

При определении местоположения объекта используются трехмерная система координат WGS84, которая охватывает всю планету и имеет погрешность менее 2 сантиметров, а также система из 32 спутников, вращающихся в 6 плоскостях, передвигающихся со средней скоростью 14 000 км/ч; при этом в любой точке планеты в зоне приема GPS-навигатора будет как минимум 4 спутника. Данная система измерения обеспечивает высокую точность определения координат объектов.

Спутники GPS постоянно транслируют радиосигнал на разных частотах, условно обозначенных  $L_1=1,57542$  ГГц,  $L_2=1,22760$  ГГц и, начиная с 2013 года,  $L_5=1,17645$  ГГц. Эти сигналы могут быть приняты обычной антенной в так называемой прямой зоне видимости и использованы для вычисления местоположения точки и координат любых объектов, в том числе и объектов строительства. Каждый спутник имеет на борту очень точные атомные часы, которые синхронизируют с такими же на Земле.

Первый спутник ГЛОНАСС был выведен на орбиту в 1982 году; в 1993 году система была официально введена в эксплуатацию; с 1999 года система стала применяться в социально-экономических целях; в 2015 году создание системы было завершено.

Основу системы ГЛОНАСС составляют 28 спутников, которые движутся над поверхностью Земли в трех орбитальных плоскостях; контролируются с Земли из подмосковного центра управления системой; кроме того, как в России, так и за ее пределами организована сеть станций слежения, которые обеспечивают точность навигации в пределах 2-4 м. Состояние системы ГЛОНАСС представлено на рис. 2.

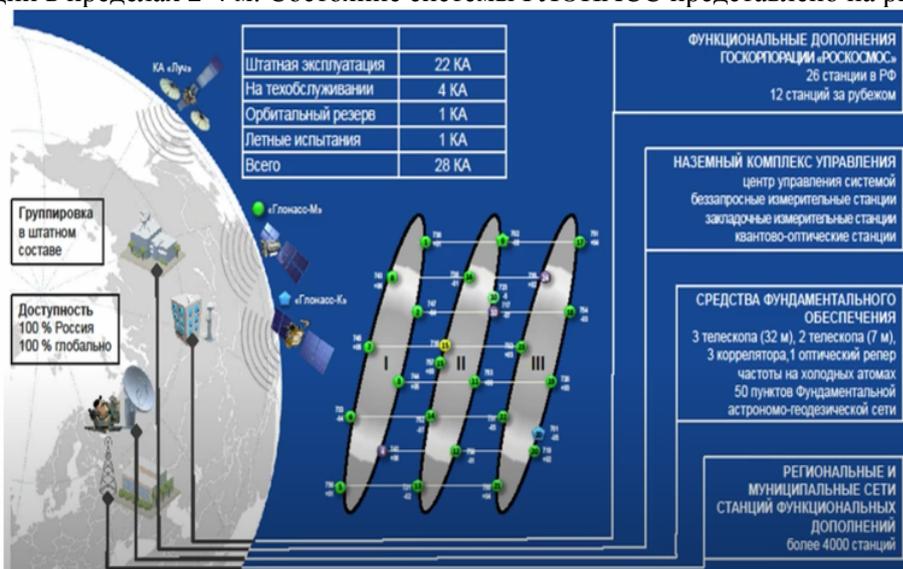


Рис. 2. Состояние системы ГЛОНАСС

На орбитах ГЛОНАСС находится два поколения космических аппаратов: ГЛОНАСС-М и ГЛОНАСС-К.

Спутник ГЛОНАСС-М имеет следующие технические характеристики: длина – 7,84 м, ширина – 7,23 м, масса – 1415 кг, срок службы – 7 лет, диаметр – 1,35 м.

Орбитальная группировка системы ГЛОНАСС постоянно обновляется, ежегодно на орбиту запускается по несколько космических аппаратов.

Важную роль для пользователей глобальных навигационных спутниковых систем играют различные функциональные дополнения, которые используются для реализации различных типов высокоточных услуг; это услуги, связанные с применением режима RTK и внедрением технологии высокоточного позиционирования, представленной национальной системой высокоточного позиционирования, системой дифференциальной коррекции и мониторинга, системой высокоточного определения эфемеридно-временной информации.

ГЛОНАСС транслирует общеземную геоцентрическую систему координат ПЗ-90.11, параметры ее связи с другими системами координат (ITRF2008, ITRF2014, WGS84); за данную систему отвечает военно-топографическое управление Генерального штаба Вооруженных сил РФ.

На основе системы ГЛОНАСС реализованы 4 услуги, по факту это различные режимы позиционирования:

- базовый открытый сервис – абсолютный режим навигации по кодовым измерениям с использованием сигналов с открытым доступом;

- услуга повышенной надежной точности – абсолютный режим навигации по кодовым измерениям с использованием информации широкозонных, региональных и локальных функциональных дополнений;

- услуга относительной навигации – относительный режим навигации по фазовым измерениям с использованием опорного приемника (базовой станции);

- услуга высокой точности – абсолютный режим навигации по фазовым измерениям (PPP) с коммерческим доступом.

Центр контроля и подтверждения характеристик ГНСС состоит из подсистем информирования, расчета, анализа и контроля; формирования исходных данных; базового пункта слежения и выполняет следующие функции: определение потребительских характеристик системы ГЛОНАСС, расчет исходных данных для сертификации системы ГЛОНАСС, независимый мониторинг и прогнозирование основных характеристик, заданных в тактико-технических требованиях к системе ГЛОНАСС

Для улучшения доступности ГНСС-сигналов, например в условиях плотной городской застройки, где прием сигнала затруднен, с 2019 года на основе платформы ГЛОНАСС-К разрабатывается высокоорбитальный космический комплекс ГЛОНАСС, который будет состоять из 6 космических аппаратов ГЛОНАСС-В, оптимальным образом расположенных между тремя орбитальными плоскостями; полное развертывание намечено на конец 2025 года, способ выведения – парный; первый запуск намечен на 2023 год.

В зависимости от применяемой технологии и точности спутниковые определения координат делятся на абсолютные и относительные.

Важным элементом системы референчных станций является программное обеспечение, которое устанавливается на сервер и позволяет выполнять обработку и анализ данных, поступающих с базовых станций, моделировать ошибки спутниковых измерений, решать сетевую задачу, формировать дифференциальные поправки.

Использование сетевых поправок позволяет обеспечить постоянную высокую точность и надежность позиционирования в режиме реального времени даже при существенных расстояниях между базовыми станциями; с помощью программного обеспечения референчных станций возможно формирование поправок различных типов и форматов: от конкретной базовой станции, от ближайшей базовой станции, сетевые поправки с использованием технологии виртуальной базовой станции и т.д.

Общепринятыми способами сетевых решений являются следующие:

- VRS (способ виртуальной станции);

- FKP (способ площадных поправок);
- MAC.

В последнее время используются различные решения. Сетевое решение VRS было разработано в Германии в конце 1990-х гг. Сеть должна состоять минимум из трех приемников; при данной технологии моделируется состояние ионосферы, тропосферы, погрешности часов и орбит спутников, разрешаются фазовые неоднозначности; в месте работы пользователя создаются виртуальные измерения; пользователь работает от VRS-станции, расположенной рядом с ним.

Известно, что сетевое решение FKP выполняет расчет дифференциальных поправок без учета предварительного положения ровера; сервер предоставляет данные от одной базовой станции сети вместе с площадными градиентами в плоскостях «север-юг», «восток-запад»; вычисления производятся на стороне подвижного приемника; данные передаются в сообщении 59 RTCMv2 или 1034/1035 RTCMv3; используется в Германии; на основе сетевого решения FKP создана и функционирует сеть SAPOS.

Сетевое решение MAC разработано фирмой Leica в 2001 году. По данной технологии сервер осуществляет выбор мастер-станции и направляет роверу следующие данные: произведенные спутниковые определения и координаты мастер-станции; приращения координат, откорректированные после разрешения неоднозначности «сырых» наблюдений и координаты вспомогательных станций с привязкой к мастер-станции.

Данные передаются в сообщении 1015-1017/1037-1039 RTCMv3; вычисления происходят на ровере; ровер сам решает – использовать ему данные всех станций или данные от ближайшей станции.

Недостатками сетевого решения MAC являются следующие:

- очень большой объем передаваемой информации (по сравнению с технологией VRS);
- мощности на ровере не такие, как на сервере, вследствие чего нельзя объективно судить о качестве определения координат.

Корректирующая информация для работы в режиме RTK через интернет передается по протоколу NTRIP – сетевому протоколу передачи данных RTCM через IP. Данный протокол используется для передачи любых типов данных (поправок), основан на HTTP, в нем предусмотрена аутентификация по логину и паролю; для передачи различной информации пользователю нужен один IP-порт; принцип работы по протоколу NTRIP приведен на рис. 3.

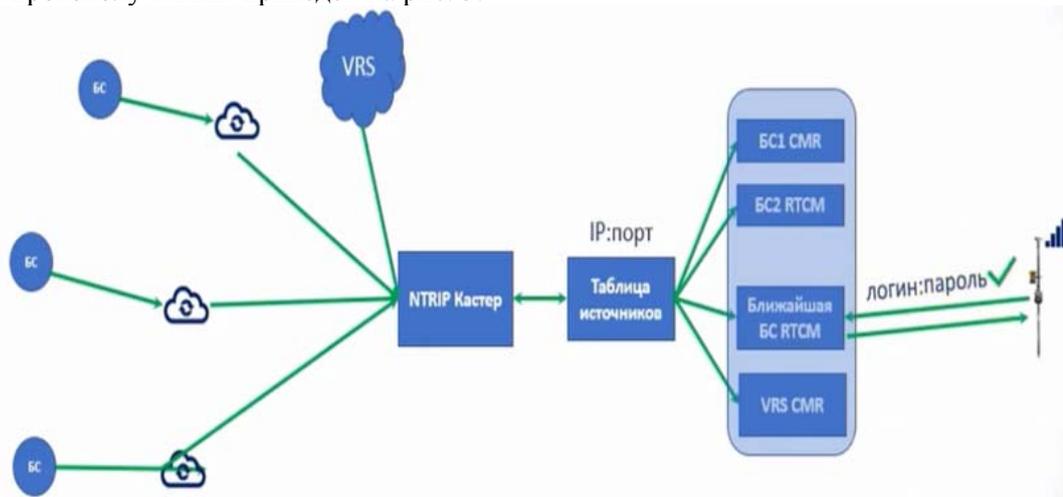


Рис. 3. Принципиальная схема работы по протоколу NTRIP

Для устойчивого приема сигнала от сети базовых станций, спутников, получения надежных решений при выполнении межевания земельного участка большое значение имеет выбор антенны приемника, который осуществляется на основании ряда крите-

риев: анализа принимаемых им группировок спутников и их сигналов, коэффициента усиления антенны, элементного усиления, стабильности фазового центра.

У каждой группировки ГНСС есть свои собственные частоты сигнала и полосы пропускания. Антенна должна покрывать частоты сигнала, передаваемые группировкой спутников, и полосу пропускания, поддерживаемую приемником ГНСС.

Коэффициент усиления – ключевой показатель эффективности антенны ГНСС. Коэффициент усиления можно определить как относительную меру способности антенны направлять или концентрировать радиочастотную энергию в определенном направлении или диаграмме направленности.

Усиление антенны напрямую связано с общим отношением С/Ш навигационных ГНСС-приемников. Следовательно, усиление антенны помогает определить отслеживающую способность системы.

Фазовый центр антенны – это точка, в которой собираются сигналы, передаваемые со спутников. Когда приемник сообщает о местоположении объекта, это местоположение, по сути, является местоположением фазового центра антенны.

Электрический фазовый центр любой антенны будет изменяться в зависимости от положения источника сигнала, который она принимает, на несколько миллиметров. Когда спутники ГНСС движутся по траектории, электрический фазовый центр принимаемого сигнала обычно перемещается вместе с положением спутника, если только антенна не была тщательно спроектирована для минимизации смещения и вариации фазового центра. Смещение фазового центра измеряется относительно базовой точки антенны как разница между механическим центром вращения антенны и фазовым центром. Смещение также зависит от частоты, т.е. для каждой частоты сигнала может быть разное смещение фазового центра. Вариация фазового центра определяет, насколько сдвигается фазовый центр относительно углов положения спутника. Ошибка в несколько миллиметров может привести к ошибке 10–15 % в полученных координатах. Для съемки в режиме RTK используют геодезические антенны, обеспечивающие высокую стабильность фазового центра и его низкую вариацию.

Основным фактором снижения точности измерений координат объектов строительства при выполнении межевания с помощью спутниковых технологий является взаимное геометрическое расположение спутников относительно антенны приемника (DOP). Геометрическое расположение спутников в том виде, в котором они представлены приемнику, влияет на точность расчетов местоположения объекта и времени. Хотя значение DOP рассчитывается с использованием сложных статистических методов, о нем можно сказать следующее: DOP – это численное представление геометрии спутника, и оно зависит от местоположения спутников, видимых приемнику. Чем меньше значение DOP, тем точнее результат вычисления времени или позиции и наоборот, если DOP очень высокий, неточность измерения положения будет намного больше, чем погрешность измерения дальности.

DOP можно использовать как основу для выбора спутников с целью минимизации DOP при выполнении геодезических работ:

– DOP выше 6 свидетельствует о недостаточной точности для операций DGNS и RTK;

– DOP меняется в зависимости от времени суток и географического положения, но для фиксирования точки на местности геометрическое представление спутников повторяется каждый день для ГНСС;

– DOP можно рассчитать без определения диапазона. Все, что нужно, – это координаты спутников и приблизительное местоположение приемника.

DOP может быть разложен на отдельные элементы, которые применяются для определенного типа измерения, например HDOP (снижение точности в плане), VDOP (снижение точности по высоте) и PDOP (снижение точности положения). Эти факторы связаны математически. В некоторых случаях, например когда траектория спутника приближается к Земле, HDOP является низким, и поэтому можно будет получить хорошее или отличное определение горизонтального положения (широты и долготы), но VDOP может быть достаточным только для определения средней высоты. Точно

так же, когда спутники группируются на высокой орбите от земли, VDOP лучше, чем HDOP.

Ситуации, когда доступные спутники расположены низко над горизонтом или сгруппированы под углом, например при съемке в городских условиях или в глубоких карьерах, могут привести к невозможности выполнения работ пользователем из-за больших значений DOP, поэтому если участок для межевания расположен в сложных для приема сигналов от спутников условиях, то следует предварительно произвести планирования измерений с помощью специальных сервисов, чтобы определить наиболее подходящее время с лучшими значениями DOP.

Основным методом проведения работ при определении координат характерных точек земельного участка для объекта строительства является метод кинематики (RTK) и его разновидность GSM RTK – метод определения координат посредством передачи поправок от базовых станций по каналам сотовой связи или интернету.

В настоящее время в России базовые станции функционируют на всей территории страны от Владивостока до Калининграда, соответственно, базовые станции принимают информацию со спутников. Принцип определения координат в режиме RTK относительно сети базовых станций представлен на рис. 4.



Рис. 4. Схема определения координат в режиме RTK относительно сети базовых станций

При RTK-съемке постоянно действующая базовая станция обеспечит поправками неограниченное число RTK-роверов в зоне своего покрытия.

При планировании спутниковых измерений, выборе сети базовых станций в соответствии с рис. 5 следует учитывать зону покрытия; оптимальным вариантом является тот, который обеспечивает хорошее покрытие от нескольких станций, ненадежным вариантом является расположение определяемого пункта на границе зоны покрытия.

В состав сети опорных, или референчных, станций входят надежно закрепленные на пилонах станции, принимающие сигналы глобальных навигационных систем и передающих их в качестве измерительной информации в вычислительный центр, который формирует корректирующую информацию и по каналам связи транслирует ее пользователю на обслуживаемой территории.

Несомненным достоинством сети референчных станций является ее автономность, т.к. данная сеть не требует постоянного нахождения специалистов в месте установки программного оборудования.

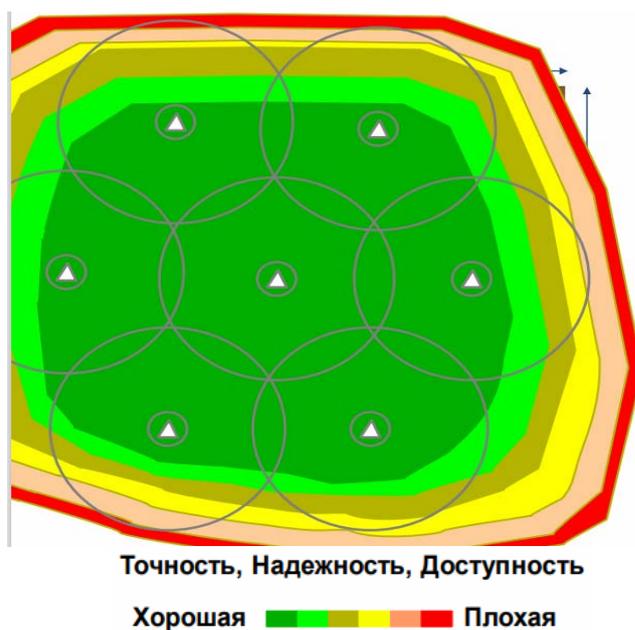


Рис. 5. Зона покрытия сети базовых станций

Важно при определении координат земельных участков для объектов строительства использовать принципы измерения полевых приемников геодезического класса точности, объединяя спутниковую и корректирующую информацию посредством GSM или GPRS-каналов, получая координаты объекта в реальном режиме времени, в заданной системе координат.

При этом объединенные в единую сеть станции обеспечивают работу большого количества пользователей на больших территориях, непрерывно, 24 часа в сутки, 365 дней в году, работая в автоматическом режиме и предоставляя пользователям измерительную и корректирующую информацию, обеспечивающую точное и надежное определение координат в любой точке, на сантиметровом уровне точности.

Это позволит исключить ошибки при определении координат земельных участков для объектов строительства при невозможности подключения сервера для работы в режиме реального времени; координаты точек определяются в камеральных условиях в режиме так называемой постобработки; для этого используется накопленная информация с приемника потребителя, а также накопленная и сохраненная на сервере сети референционных станций информация с базовых станций в тот промежуток времени, когда выполнялись работы.

К минусам работы сети референционных станций можно отнести то, что их сеть неравномерно развита по стране, в настоящее время отсутствует единая политика развития региональных сетей референционных станций, единая методика испытаний аппаратно-программного комплекса спутниковых сетей точного позиционирования и процедура утверждения их типа (сертификация). Это существенно тормозит продвижение данной технологии.

Кроме того, на основании проведенного исследования выявлен ряд проблем, связанных с эксплуатацией данных сетей, в частности отсутствует нормативно-правовая база, регламентирующая бы на законодательном уровне статус референционной станции как пункта ГГС; на данный момент базовая станция не является пунктом ГГС, а закрепление станций не соответствует требованиям Правил закрепления центров пунктов ФАГС, ВГС и СГС-1 спутниковой сети.

Но учитывая выявленные новые возможности спутниковых технологий в области строительства на современном этапе, можно говорить о существенном увеличении роли GNSS-оборудования в выполнении геодезических работ, в частности, в определении точных координат земельных участков объектов строительства.

1. Eremkin, A.I. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – P. 012005.
2. Пономарева, И.К. Бизнес-планирование на предприятии / И.К. Пономарева, И.В. Акифьев, В.Д. Быстрова // *Научное обозрение*. – 2014. – № 9–2. – С. 663–665.
3. Горобец, В.П. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года/ В.П. Горобец, Г.Н. Ефимов, И.А. Столяров // *Вестник СГУГиТ*. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 24–37.
4. Постановление Правительства РФ от 28 июля 2000 г. № 568 «Об установлении единых государственных систем координат».
5. Постановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 г №1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы».
6. Приказ Росреестра от 23 марта 2016 г. № П/0134 «Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года».
7. Постановления Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат».
8. Федеральный закон от 30.12.2015 г. № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
9. ITRF2014. Description. – URL: [http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/)
10. Приказ от 15 апреля 2002 г. № П/261 об утверждении «Основных положений об опорной межевой сети». Федеральная служба земельного кадастра России. Москва 2002 г. [Электронный ресурс] // ИПС «КонсультантПлюс» – URL: <http://www.consultant.ru>

## References

1. Eremkin, A.I. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – P. 012005.
2. Ponomareva, I.K. Business planning at the enterprise / I.K. Ponomareva, I.V. Akifiev, V.D. Bystrova // *Scientific Review*. – 2014. – No. 9–2. – P. 663–665.
3. Gorobets, V.P. The experience of the Russian Federation in establishing the state coordinate system of 2011 / V.P. Gorobets, G.N. Efimov, I.A. Stolyarov // *Bulletin of the SSUGiT*. – 2015. – Issue 2 (30). – P. 24–37.
4. Decree of the Government of the Russian Federation No. 568 of July 28, 2000 «On the establishment of unified state coordinate systems».
5. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1240 dated November 24, 2016 «On the establishment of State coordinate systems, State Elevation system and State Gravimetric System».
6. Rosreestr Order No. P/0134 dated March 23, 2016 «On approval of geometric and physical numerical geodetic parameters of the State Geodetic coordinate system of 2011».
7. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1463 dated December 28, 2012 «On Unified State coordinate systems».
8. Federal Law No. 431-FZ of December 30, 2015 «On Geodesy, Cartography and Spatial Data and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation».
9. ITRF2014. Description. – URL: [http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/)
10. Order No. P/261 of April 15, 2002 on the approval of the «Basic provisions on the reference boundary network». Federal Land Cadastre Service of Russia. Moscow 2002 // IPS «ConsultantPlus». – URL: <http://www.consultant.ru>

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Андреев Сергей Юрьевич**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

*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

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

**Лебединский Константин Валерьевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Транспортные машины»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

*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

*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

*Penza State University*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

**Lebedinskiy Konstantin Valerevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Transport Machines»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСРЕДНЕННЫХ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ГИДРАВЛИЧЕСКИ ГЛАДКИХ И ВПОЛНЕ ШЕРОХОВАТЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДАХ

С.Ю. Андреев, В.А. Князев, К. В. Лебединский

Приведены результаты теоретических исследований гидродинамических характеристик напорных технологических трубопроводов, работающих в режимах гидравлически гладких и вполне шероховатых труб. Выполнен сравнительный анализ методик расчета распределения величин осредненных местных скоростей турбулентного потока жидкости в поперечном сечении напорного осесимметричного трубопровода. Получены уточненные математические зависимости, позволяющие определять величины осредненных местных скоростей турбулентного потока жидкости в поперечном сечении напорного осесимметричного трубопровод. Полученные математические зависимости могут быть использованы при проектировании напорных технологических трубопроводов.

*Ключевые слова: местная скорость, относительная шероховатость, гидравлически гладкие трубы, вполне шероховатые трубы, динамическая скорость, число Никурадзе, критерий Рейнольдса*

## AVERAGED LOCAL FLUID FLOW RATES IN HYDRAULICALLY SMOOTH AND QUITE ROUGH PROCESS PIPELINES

S.Yu. Andreev, V.A. Knyazev, K. V. Lebedinskiy

The results of theoretical studies of the hydrodynamic characteristics of pressure mixing process pipelines operating in the modes of hydraulically smooth and quite rough pipes are presented. A

comparative analysis of methods for calculating the distribution of the values of the averaged local velocities of the turbulent fluid flow in the cross section of the pressure axisymmetric pipeline is performed. Refined mathematical dependences are obtained that allow determining the values of the averaged local velocities of the turbulent fluid flow in the cross section of the pressure axisymmetric pipeline. The obtained mathematical dependences can be used in the design of pressure technological pipelines.

*Keywords: local velocity, relative roughness, hydraulically smooth pipes, completely rough pipes, dynamic velocity, Nikuradze number, Reynolds criterion*

В практике расчета и эксплуатации инженерных трубопроводных систем, как правило, приходится иметь дело с турбулентным режимом течения жидкости. Степень турбулентности определяет величину удельных затрат энергии на перекачку жидкости, интенсивность протекания процессов массопереноса и теплопереноса в потоке.

Турбулентный режим течения жидкости возникает при достижении числом Рейнольдса своего критического значения  $Re_{н.кр} = 2300$  и переходит в область развитой турбулентности при критической величине числа Рейнольдса  $Re_{в.кр}$ .

В области развитой турбулентности величина коэффициента гидравлического трения (коэффициента Дарси)  $\lambda$  зависит только лишь от значения безразмерной величины относительной шероховатости стенок трубы  $\bar{\Delta}$ , определяемой как отношение величины эквивалентной шероховатости стенок трубы  $\Delta_э$  (м) к ее диаметру  $d$  (м) и не зависит от критерия Рейнольдса, в связи с чем эту область также называют квадратической зоной сопротивления или областью автомодельности режима течения жидкости.

В области развитой турбулентности величина коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{кв}$  может быть определена по зависимости Л. Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{кв}}} = 2 \lg \frac{d}{\Delta_э} + 1,14. \quad (1)$$

Откуда

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{кв}}} = 2 \lg \frac{d}{\Delta_э} + 2 \lg 3,7 = 2 \lg 3,7 \frac{d}{\Delta_э} \quad (2)$$

и

$$\lambda_{кв} = \frac{0,25}{(\lg 3,7 \frac{d}{\Delta_э})^2}. \quad (3)$$

Индекс «кв» в формулах (1), (2), (3) означает, что данные формулы действуют в квадратической области сопротивления.

В переходной области турбулентности величина коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  зависит как от значения относительной шероховатости стенок трубы  $\bar{\Delta} = \frac{\Delta_э}{d}$ , так и от величины критерия Рейнольдса и определяется по формуле Альтшуля А. Д.

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (4)$$

При турбулентном режиме течения в области гидравлически гладких труб величина коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  зависит только лишь от критерия Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (5)$$

В этой области течения жидкости также может быть использована зависимость Л. Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \text{Re} \sqrt{\lambda} - 0,8. \quad (6)$$

Даже простейший анализ турбулентного режима обнаруживает сложность закономерностей движения жидкости. Именно это обстоятельство и объясняет то, что до настоящего времени нет строгого решения проблем турбулентности, хотя актуальность рассматриваемых вопросов трудно переоценить.

В настоящее время для количественного описания характеристик турбулентных потоков жидкости широко используется полуэмпирическая теория Л. Прандтля, на основании которой были получены логарифмические законы, описывающие распределение величин осредненных местных скоростей  $\bar{U}_y$  по поперечному сечению потока в гидравлически гладких трубах и трубах, работающих в области квадратического закона сопротивлений [1]:

$$\frac{\bar{U}_y}{v_*} = \frac{1}{\aleph} \ln \frac{v_* y}{\nu} + 5,5 \quad (7)$$

и

$$\frac{\bar{U}_y}{v_*} = \frac{1}{\aleph} \ln \frac{y}{\Delta_3} + 8,50, \quad (8)$$

где  $\aleph = 0,4$  – константа Кармана;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\bar{U}_y$  и  $v_*$  – соответственно величины осредненной за достаточно большой промежуток времени местной скорости турбулентного потока жидкости на расстоянии  $y$  (м) от стенки трубы и динамической скорости (скорости касательного напряжения  $\tau_*$  (Па) в пристеночной области потока),

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}} = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \text{ м/с}; \quad (9)$$

здесь  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – средняя скорость потока жидкости, м/с.

Формулы (7) и (8) не являются универсальными, поскольку они не описывают наиболее важной для практических целей переходной области между гидравлически гладким и вполне шероховатым трением.

В работе [2] описываются графоаналитические исследования логарифмического закона распределения величин осредненных местных скоростей по сечению гидравлически гладких труб.

На рисунке представлен график распределения величин осредненной относительной местной скорости турбулентного потока жидкости  $\frac{\bar{U}_y}{v_*}$  по сечению гидравлически гладкой трубы, построенный в соответствии с экспериментальными данными по значениям аргумента логарифма  $\frac{v_* y}{\nu}$  в формуле (7) [2].

Прямая линия на графике, изображенном на рисунке, отвечает формуле логарифмического закона (7). Ее пересечение с осью ординат соответствует величине относительной осредненной местной скорости  $\frac{\bar{U}_y}{u_*} = 5,1$  при значении

$\frac{u_* y}{\nu} = 1$  ( $\ln \frac{u_* y}{\nu} = 0$ ), вследствие чего формула (4) может быть записана в виде

$$\frac{\bar{U}_y}{u_*} = \frac{1}{N} \ln \frac{u_* y}{\nu} + 5,1. \quad (10)$$

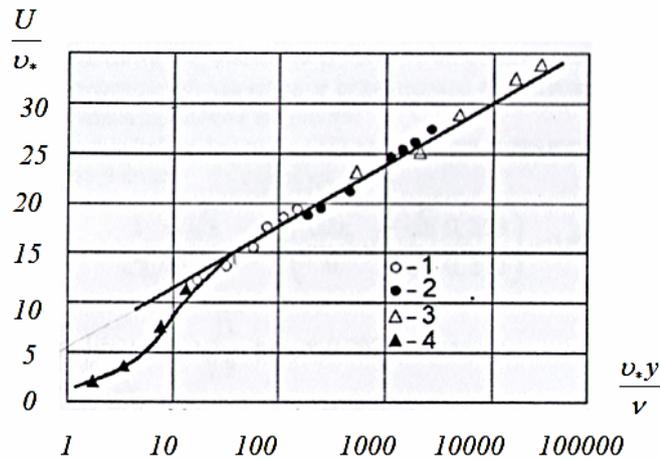


График распределения величин осредненной относительной местной скорости турбулентного потока жидкости  $\frac{\bar{U}_y}{u_*}$  по сечению гидравлически гладкой трубы:

1 –  $Re=4 \cdot 10^3$ ; 2 –  $Re=4,1 \cdot 10^5$ ; 3 –  $Re=2 \cdot 10^6$ ; 4 – опыты Рейхардта

В соответствии с представлениями Л. Прандтля, весь поток жидкости в трубе условно можно подразделить на две основные зоны: пристеночный слой, имеющий толщину  $\delta$  (м), и ядро потока [1]. Толщина пристеночного слоя может быть определена по формуле

$$\delta = N \frac{\nu}{u_*}, \text{ м.} \quad (11)$$

Число Никурадзе  $N$  в формуле (8) по своей структуре аналогично числу Рейнольдса, и вследствие этого в условиях перехода от течения жидкости в пристеночном слое, где определяющую роль играют силы вязкого трения, к турбулентному течению в ядре потока оно должно иметь постоянное значение

$$N = \frac{\delta u_*}{\nu} = \frac{\bar{U}_\delta}{u_*} = \text{const}, \quad (12)$$

где  $\bar{U}_\delta$  – осредненное значение величины местной скорости потока жидкости на границе пристеночного слоя,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Величина коэффициента 5,5 в формуле (7) связана с числом Никурадзе соотношением

$$5,5 = N - \frac{1}{N} \ln N = N - \frac{1}{0,4} \ln N \quad (13)$$

Откуда  $N=11,64$ .

Величину эквивалентной шероховатости стенки трубы  $\Delta_{\text{э}}$  определяют расчетным путем, подставляя в формулу (1) известное значение диаметра трубы  $d$  и величину коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{\text{КВ}} = \text{const}$ , определенную экспериментально в ходе гидравлических исследований трубы в области квадратичного закона сопротивления:

$$\Delta_{\text{э}} = \frac{3,7d}{10^{\sqrt{\lambda_{\text{КВ}}}}}, \text{ м.} \quad (14)$$

В соответствии с представлениями Л. Прандтля, соотношение величин эквивалентной шероховатости стенок трубы  $\Delta_{\text{э}}$  и толщины пристеночного слоя  $\delta$  определяет область гидравлического сопротивления трубы.

- В области гидравлически гладких труб все выступы шероховатостей стенки трубы полностью покрыты вязким подслоем ( $\frac{\Delta_{\text{э}}}{\delta} \ll 2$ ) и не нарушают целостности последнего. В этом случае выступы шероховатостей стенки трубы не влияют на гидравлическое сопротивление, и величина коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  зависит только от числа Рейнольдса  $Re$  и определяется по формуле (5).

- В переходной области турбулентного течения некоторые выступы шероховатостей стенки трубы выходят за пределы пристеночного слоя ( $\frac{\Delta_{\text{э}}}{\delta} < 2$ ). В этом случае величина коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  зависит как от числа Рейнольдса  $Re$ , так и от значения относительной шероховатости стенки трубы  $\frac{\Delta_{\text{э}}}{d}$  и определяется по формуле (4).

- В области вполне шероховатых труб (области квадратичного закона сопротивления) большинство выступов шероховатостей стенки трубы выходят за пределы пристеночного слоя ( $\frac{\Delta_{\text{э}}}{\delta} = 2$ ). В этом случае величина коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  зависит только от значения относительной шероховатости стенки трубы  $\frac{\Delta_{\text{э}}}{d}$  и определяется по формуле Л. Прандтля (3).

Для критической точки перехода турбулентного режима течения жидкости в область квадратичного закона сопротивления, с учетом формулы (11), величина толщины пристеночного слоя может быть определена как

$$\delta_{\text{КВ}} = \frac{\Delta_{\text{э}}}{2} = N \frac{v}{v_{*_{\text{в.к.}}}} = \text{const}. \quad (15)$$

В формуле (15) индекс «кв» обозначает, что величина толщины пристеночного слоя определяется в квадратической области сопротивления и по аналогии с коэффициентом гидравлического трения  $\lambda_{\text{КВ}}$  она имеет постоянное значение  $\delta_{\text{КВ}} = \text{const}$ .

Величина динамической скорости  $v_{*_{\text{в.к.}}}$  определяется в критической точке турбулентного режима, характеризующей переход в область квадратичного закона сопротивления, по формуле

$$v_{*_{\text{в.к.}}} = v_{\text{вк}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{КВ}}}{8}}, \text{ м/с}, \quad (16)$$

где  $v_{\text{вк}}$  – величина средней скорости потока жидкости в критической точке турбулентного режима, м/с.

Из (15) и (16) имеем

$$v_{*_{\text{в.к.}}} = \frac{Nv}{\delta_{\text{КВ}}} = \frac{2Nv}{\Delta_{\text{Э}}} = v_{\text{вк}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{КВ}}}{8}}, \text{ м/с}, \quad (17)$$

откуда

$$\lambda_{\text{КВ}} = 32 \left( N \frac{v}{v_{\text{вк}} \Delta_{\text{Э}}} \right)^2 = 32 \left( \frac{N}{\text{Re}_{\Delta_{\text{вк}}}} \right)^2, \quad (18)$$

где 
$$\text{Re}_{\Delta_{\text{вк}}} = \frac{v_{\text{вк}} \Delta_{\text{Э}}}{\nu}. \quad (19)$$

Для ламинарного режима течения жидкости выполняется зависимость

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (20)$$

По аналогии с формулой (20) для квадратической области закона сопротивления турбулентного режима течения жидкости можно записать

$$\lambda_{\text{КВ}} = \left( \frac{64}{\text{Re}_{\Delta_{\text{вк}}}} \right)^2 \quad (21)$$

Из формул (19) и (21) имеем

$$32 \left( \frac{N}{\text{Re}_{\Delta_{\text{вк}}}} \right)^2 = \left( \frac{64}{\text{Re}_{\Delta_{\text{вк}}}} \right)^2, \quad (22)$$

откуда

$$N = \frac{64}{\sqrt{32}} = 11,31. \quad (23)$$

Из (19) и (21) может быть получена формула для определения величины числа Рейнольдса в критической точке турбулентного режима течения жидкости

$$\text{Re}_{\text{вк}} = \text{Re}_{\Delta_{\text{вк}}} \frac{d}{\Delta_{\text{Э}}} = \frac{v_{\text{вк}} \Delta_{\text{Э}}}{\nu} \frac{d}{\Delta_{\text{Э}}} = \frac{64}{\sqrt{\lambda_{\text{КВ}}}} \frac{d}{\Delta_{\text{Э}}}. \quad (24)$$

При величине числа Никурадзе  $N=11,31$  уточненная величина константы в логарифмическом законе, описывающем распределение осредненных местных скоростей  $\bar{U}_y$  по поперечному сечению потока жидкости в гидравлически гладких трубах, будет иметь значение

$$C = N - \frac{1}{\text{N}} \ln N = 11,31 - \frac{1}{0,4} \ln 11,31 = 5,25, \quad (25)$$

и формула (7) запишется в виде

$$\frac{\bar{U}_y}{v_*} = \frac{1}{\text{N}} \ln \frac{v_* y}{\nu} + 5,25. \quad (26)$$

Из формул (7) и (8) следует, что относительный дефицит местной скорости  $\bar{U}_y$  от максимальной скорости на оси потока  $\bar{U}_0$  как в трубах, работающих в области

квадратического закона сопротивления, так и в гидравлически гладких трубах имеет значение

$$\frac{\bar{U}_{r_0} - \bar{U}_y}{\nu_*} = \frac{1}{\aleph} \ln \frac{r_0}{y} \quad (27)$$

Из формулы (27) можно определить осредненную скорость турбулентного потока жидкости на расстоянии  $y$  от стенки трубы

$$\bar{U}_y = \bar{U}_{r_0} - \frac{\nu_*}{\aleph} \ln \frac{r_0}{y}, \text{ м/с.} \quad (28)$$

Величина расхода жидкости  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) в трубе круглого сечения радиусом  $r_0$  ( $\text{м}$ ) может быть определена как сумма элементарных расходов жидкости  $dQ$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). Элементарный расход жидкости  $dQ$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), проходящей через кольцевое сечение, имеющее элементарную площадь  $d\omega$  ( $\text{м}^2$ ) и толщину  $dy$  ( $\text{м}$ ) и удаленное от потока на расстояние  $r = r_0 - y$  ( $\text{м}$ ), имеет значение

$$dQ = \bar{U}_y d\omega = \bar{U}_y 2\pi(r_0 - y) dy, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (29)$$

тогда

$$Q = \int_{y=0}^{r_0} \bar{U}_y 2\pi(r_0 - y) dy, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (30)$$

Подставив в (30) значение  $\bar{U}_y$  из (28), получим:

$$Q = \int_{y=0}^{r_0} \left( \bar{U}_{r_0} - \frac{\nu_*}{\aleph} \ln \frac{r_0}{y} \right) 2\pi(r_0 - y) dy = \pi r_0^2 \left( \bar{U}_{r_0} - \frac{3\nu_*}{2\aleph} \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (31)$$

С учетом того, что  $Q = \nu \pi r_0^2$ , имеем

$$\nu \pi r_0^2 = \pi r_0^2 \left( \bar{U}_{r_0} - \frac{3\nu_*}{2\aleph} \right), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (32)$$

и

$$D = \frac{\bar{U}_{r_0} - \nu}{\nu_*} = \frac{3}{2\aleph} = 3,75 \text{ при } \aleph = 0,4. \quad (33)$$

Таким образом, величина относительного дефицита средней скорости от максимальной осредненной местной скорости жидкости на оси потока при постоянной величине константы Кармана – Прандтля  $\aleph = 0,4$  имеет постоянное значение, равное  $D = 3,79$ .

Из формулы (33) могут быть определены величины осредненной максимальной местной скорости на оси потока  $\bar{U}_{r_0}$  ( $\text{м/с}$ ) и относительной средней скорости  $\frac{\nu}{\nu_*}$ :

$$\bar{U}_{r_0} = \nu + 3,75\nu_* = \nu + 3,75\nu \sqrt{\frac{\lambda}{8}} = \nu \left( 1 + 3,75\sqrt{\frac{\lambda}{8}} \right), \text{ м/с}, \quad (34)$$

$$\frac{\nu}{\nu_*} = \frac{\bar{U}_{r_0}}{\nu_*} - \frac{3}{2\aleph} \quad (35)$$

Результаты вычислений характеристик турбулентного потока жидкости для гидравлически гладкой трубы диаметром  $d = 0,05$  м представлены в табл. 1.

Результаты вычислений характеристик турбулентного потока жидкости для гидравлически гладкой трубы диаметром  $d = 0,05$  м

Наименование характеристики турбулентного потока жидкости в гидравлически гладкой трубе	Величина характеристики турбулентного потока жидкости					
Критерий Рейнольдса $Re = \frac{vd}{\nu}$	7500	10000	12500	15000	17500	20000
Средняя скорость $v = \frac{Rev}{d}$ , м/с	0,1515	0,2020	0,2525	0,3030	0,3535	0,4040
Коэффициент гидравлического трения $\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$	0,03396	0,03160	0,02989	0,02855	0,02747	0,02657
Динамическая скорость $v_* = v\sqrt{\frac{\lambda}{8}}$ , м/с	0,00987	0,1270	0,01543	0,01810	0,02072	0,02328
Максимальная скорость потока, рассчитанная по формуле (34), $\bar{U}_{r_0} = v \left( 1 + 3,75\sqrt{\frac{\lambda}{8}} \right)$ , м/с	0,1885	0,2496	0,3104	0,3709	0,4312	0,4913
Максимальная скорость потока, рассчитанная по формуле (7), $\bar{U}_{r_0} = v_* \left( \frac{1}{\aleph} \ln \frac{v_* r_0}{\nu} + 5,5 \right)$ , м/с	0,1900	0,2524	0,3142	0,3758	0,4372	0,4980
Максимальная скорость потока, рассчитанная по формуле (10), $\bar{U}_{r_0} = v_* \left( \frac{1}{\aleph} \ln \frac{v_* r_0}{\nu} + 5,1 \right)$ , м/с	0,1860	0,2474	0,3080	0,3686	0,4289	0,4887
Максимальная скорость потока, рассчитанная по формуле (26), $\bar{U}_{r_0} = v_* \left( \frac{1}{\aleph} \ln \frac{v_* r_0}{\nu} + 5,25 \right)$ , м/с	0,1875	0,2493	0,3104	0,3713	0,4320	0,4922
Относительная погрешность вычислений по формулам (7), и (34), $\bar{\Delta}$ , %	0,79	1,11	1,21	1,30	1,37	1,35
Относительная погрешность вычислений по формулам (10) и (34), $\bar{\Delta}$ , %	1,32	0,88	0,77	0,62	0,53	0,53
Относительная погрешность вычислений по формулам (26) и (34), $\bar{\Delta}$ , %	0,53	0,12	0,00	0,11	0,19	0,18

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что:

1) относительная погрешность вычислений осредненных величин максимальной скорости потока жидкости на оси гидравлически гладкой трубы, рассчитанных по формулам (7) и (34), составляет  $\bar{\Delta} = 0,79 - 1,37\%$ ;

2) относительная погрешность вычислений осредненных величин максимальной скорости потока жидкости на оси гидравлически гладкой трубы, рассчитанных по формулам (10) и (34), составляет  $\bar{\Delta} = 0,53 - 1,32\%$ ;

3) относительная погрешность вычислений осредненных величин максимальной скорости потока жидкости на оси гидравлически гладкой трубы, рассчитанных по формулам (26) и (34), составляет  $\bar{\Delta} = 0,00 - 0,53\%$ ;

4) формула (26) позволяет более точно определить осредненную величину максимальной скорости потока на оси гидравлически гладкой трубы, чем формулы (7) и (10).

Из формулы (34) может быть определена величина относительной осредненной максимальной местной скорости  $\bar{U}_{r_0}$  на оси турбулентного потока жидкости:

$$\frac{\bar{U}_{r_0}}{v_*} = \frac{v}{v_*} \left( 1 + 3,75 \sqrt{\frac{\lambda_{KB}}{8}} \right) = \frac{v}{v \sqrt{\frac{\lambda_{KB}}{8}}} \left( 1 + 3,75 \sqrt{\frac{\lambda_{KB}}{8}} \right) = \sqrt{\frac{8}{\lambda_{KB}}} + 3,75. \quad (36)$$

Величина относительной осредненной максимальной местной скорости  $\bar{U}_{r_0}$  на оси турбулентного потока жидкости в шероховатой трубе также может быть определена как

$$\frac{\bar{U}_{r_0}}{v_*} = \frac{1}{0,4} \ln \frac{r_0}{\Delta_3} + C_{III} = \frac{1}{0,4} \ln 0,5 \frac{d}{\Delta_3} + C_{III}, \quad (37)$$

где  $C_{III}$  – величина коэффициента в формуле логарифмического закона Л. Прандтля для гидравлически шероховатых труб.

Из (36) и (37) имеем

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda_{KB}}} + 3,75 = \frac{1}{0,4} \ln 0,5 \frac{d}{\Delta_3} + C_{III}, \quad (38)$$

откуда

$$C_{III} = \sqrt{\frac{8}{\lambda_{KB}}} - \frac{1}{0,4} \ln 0,5 \frac{d}{\Delta_3} + 3,75. \quad (39)$$

Взаимосвязь между значениями коэффициента  $C_{III}$  и величиной коэффициента гидравлического трения в области квадратичного закона сопротивления  $\lambda_{KB}$  может быть аппроксимирована зависимостью

$$C_{III} = 9,069 \lambda_{KB}^{0,0196}. \quad (40)$$

Из формулы (1) может быть получена величина относительной средней скорости турбулентного потока жидкости в гидравлически шероховатой трубе:

$$\frac{\bar{U}_{r_0}}{v_*} = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda_{KB}}} = 2\sqrt{8} \lg \frac{d}{\Delta_3} + 1,14\sqrt{8} = 5,7 \lg \frac{r_0}{\Delta_3} + 5,7 \lg 2 + 3,22 = 5,7 \lg \frac{r_0}{\Delta_3} + 4,94. \quad (41)$$

Из формул (37) и (35) следует, что

$$\frac{v}{v_*} = 5,7 \lg \frac{r_0}{\Delta_3} + 4,94 = \frac{1}{0,4} \ln \frac{r_0}{\Delta_3} + C_{III} - \frac{3}{2\aleph} = 5,7 \lg \frac{r_0}{\Delta_3} + C_{III} - \frac{3}{2\aleph}, \quad (42)$$

откуда

$$\aleph = \frac{3}{2(C_{\text{ш}} - 4,94)}. \quad (43)$$

Величина параметра Кармана для гидравлически шероховатых труб не является постоянной величиной.

Взаимосвязь между значениями параметра Кармана  $\aleph$  и величиной коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{\text{КВ}}$  в области квадратичного закона сопротивления может быть аппроксимирована зависимостью

$$\aleph = 0,357\lambda_{\text{КВ}}^{-0,0498}. \quad (44)$$

Результаты вычислений характеристик турбулентного потока жидкости в области квадратичного закона сопротивления для труб с различной величиной относительной гладкости стенок  $\frac{d}{\Delta_3}$  представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты вычислений характеристик турбулентного потока жидкости в области квадратичного закона сопротивления для труб с различной величиной относительной гладкости стенок  $\frac{d}{\Delta_3}$

Относительная гладкость стенок трубы $\frac{d}{\Delta_3}$	250	500	750	1000	1250	1500
Коэффициент гидравлического трения $\lambda_{\text{КВ}} = \frac{0,25}{\left(\lg 3,7 \frac{d}{\Delta_3}\right)^2}$	0,02842	0,02342	0,02169	0,01964	0,01861	0,01783
Коэффициент $C_{\text{ш}}$ , вычисленный по формуле (39), $C_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{8}{\lambda_{\text{КВ}}} - \frac{1}{0,4} \ln 0,5 \frac{d}{\Delta_3}} + 3,75$	8,458	8,428	8,411	8,398	8,389	8,381
Коэффициент $C_{\text{ш}}$ , вычисленный по формуле (40), $C_{\text{ш}} = 9,069\lambda_{\text{КВ}}^{0,0196}$	8,458	8,426	8,408	8,397	8,388	8,381
Параметр Кармана, вычисленный по формуле (43), $\aleph = \frac{3}{2(C_{\text{ш}} - 4,94)}$	0,426	0,430	0,433	0,434	0,435	0,436
Параметр Кармана, вычисленный по формуле (44), $\aleph = 0,357\lambda_{\text{КВ}}^{-0,0498}$	0,426	0,430	0,433	0,434	0,435	0,436
Относительная погрешность, вычисленная, по формулам (39) и (40), $\bar{\Delta}$ , %	0,00	0,02	0,04	0,1	0,01	0,00
Относительная погрешность, вычисленная по формулам (43) и (44), $\bar{\Delta}$ , %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что:

1) коэффициент  $C_{III}$  в формуле Л. Прандтля, описывающей распределение величин осредненных местных скоростей  $\bar{U}_y$  по поперечному сечению потока жидкости в области квадратичного закона сопротивлений, не является постоянной величиной;

2) при изменении величины относительной гладкости стенок труб от  $\frac{d}{\Delta_3} = 250$

до  $\frac{d}{\Delta_3} = 1500$  величина коэффициента  $C_{III}$  изменяет свое значение от 8,458 до 8,381;

3) относительная погрешность вычислений величин коэффициента  $C_{III}$  по формулам (39) и (40) составляет  $\bar{\Delta} = 0,00 - 0,04\%$ .

Проведенные теоретические исследования закономерностей распределения величин местных скоростей турбулентных потоков вязких жидкостей по радиусу их поперечных сечений в режимах гидравлически гладкого трения и области квадратичного закона сопротивлений позволили сделать следующие выводы:

1. Переход турбулентного потока вязкой жидкости в область квадратичного закона сопротивлений происходит при верхнем критическом значении числа Рейнольдса, имеющем величину  $Re_{вк} = \frac{64}{\sqrt{\lambda_{КВ}}} \frac{d}{\Delta_3}$ .

2. Уточненное значение числа Никурадзе, определяемого как отношение произведения величин эквивалентной шероховатости стенки трубы  $\Delta_{ЭК}$  и динамической скорости  $U_{*в.к.}$  к удвоенной величине кинематического коэффициента вязкости жидкости  $\nu$  в точке перехода в область квадратичного закона сопротивлений, равно  $11,31 \left( N = \frac{\Delta_{ЭК} U_{*в.к.}}{2\nu} = \frac{64}{\sqrt{32}} = 11,3137 \right)$ .

3. При значении числа Никурадзе  $N=11,31$  и постоянной Кармана  $\aleph=0,4$  уточненная величина коэффициента в логарифмическом законе Л. Прандтля, описывающем распределение осредненных местных скоростей  $\bar{U}_y$  по поперечному сечению потока жидкости в гидравлически гладких трубах, имеет значение  $C_{ГГ} = 11,31 - \frac{1}{0,4} \ln 11,31 = 5,25$ .

4. Уточненное значение коэффициента  $C_{ГГ} = 5,25$  позволяет рассчитать осредненную величину максимальной скорости потока на оси гидравлически гладкой трубы  $\bar{U}_y$  при числах Рейнольдса  $Re=7500-20000$  с относительной погрешностью вычислений  $\bar{\Delta} = 0,00 - 0,53\%$ .

5. При турбулентном течении жидкости в области квадратичного закона сопротивления величина коэффициента Л. Прандтля  $C_{III}$  не имеет постоянного значения и уменьшается при повышении относительной гладкости стенок трубы с  $\frac{d}{\Delta_3} = 250$  до

$\frac{d}{\Delta_3} = 1500$  с величины  $C_{III} = 8,458$  до  $C_{III} = 8,381$ .

6. Использование аппроксимирующей зависимости  $C_{III} = 9,069\lambda_{КВ}^{0,0196}$  позволяет вычислять величину коэффициента  $C_{III}$  с относительной погрешностью  $\bar{\Delta} = 0,00 - 0,04\%$ .

Список литературы

1. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика (перевод со второго немецкого издания) / Л. Прандтль. – Ижевск: Н.И.Ц. «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 276 с.
2. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.

References

1. Prandtl, L. Hydroaeromechanics (translated from the second German edition) / L. Prandtl. – Izhevsk: N.I.Ts Publishing House «Regular and chaotic dynamics», 2000. – 276 p.
2. Landau, L.D. Hydrodynamics / L.D. Landau, E.M. Lifshits. – M.: Fizmatlit, 2006. – 736 p.

УДК 697.921.42:001.891.5

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_132

*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: tgv@pguas.ru**Орлова Наталья Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»  
E-mail: tgv@pguas.ru*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40, тел.: (8412) 36-82-09**Пономарева Инна Константиновна**, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Информационное обеспечение управления и производства»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru*Penza State University of Architecture and Construction*

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

**Eremkin Aleksander Ivanovich**, Doctor of Sciences, Professor, Head of the department «Heat, Gas Supply and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru**Averkin Aleksandr Grigorevich**, Doctor of Sciences, Professor of the department «Heat and Ventilation»  
E-mail: tgv@pguas.ru**Orlova Natalya Alexandrovna**, Candidate of Sciences, assistant Professor of the department «Heat and Ventilation»  
E-mail: tgv@pguas.ru*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 «Information Support Management and Production»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СКОРОСТНЫХ ПОЛЕЙ В ЗОНЕ ВСАСЫВАЮЩЕГО ОТВЕРСТИЯ ВЫТЯЖНОГО ЗОНТА

А.И. Ерёмкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова

Проблемы создания микроклимата в залах богослужения и предотвращения загрязнений убранства в православных храмах являются актуальной задачей. Основными причинами загрязнений служат выделение вредностей в виде копоти, сажи, влаги, углекислого газа и др., образующихся при сгорании свечей на подсвечниках, и отсутствие способов их локализации. Разработаны методика и программа проведения экспериментальных исследований на лабораторном стенде, позволяющие исследовать профили скоростных и температурных полей в зоне всасывания вытяжного зонта, а также концентрацию вредностей при сгорании свечей на подсвечнике.

*Ключевые слова: открытый вытяжной зонт, профили скоростей и температуры, зона всасывания зонта, вредности, копоть и сажа, отсасываемый воздух, свеча, зона свободного пространства, объемная концентрация вредностей, подсвечник, храм, зал богослужения, микроклимат, убранство, термоанемометр, координатник, микроманометр*

## METHODOLOGY AND EXPERIMENTAL STUDIES PROGRAM OF TEMPERATURE AND VELOCITY FIELDS IN THE ZONE OF THE SUCTION HOLE OF THE HOOD

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova,

The problems of creating a microclimate in the halls of worship and preventing contamination of the decoration in Orthodox churches are an urgent task. The main causes of pollution are the release of harmful substances in the form of soot, moisture, carbon dioxide, etc. formed during the

combustion of candles on candlesticks and the lack of methods for their localization. To solve the actual problem, the authors have developed a methodology and a program for conducting experimental studies on a laboratory stand, which makes it possible to investigate the profiles of speed and temperature fields in the suction zone of an exhaust hood as well as the concentration of harmful substances during the combustion of candles on a candlestick.

*Keywords: open exhaust hood, speed and temperature profiles, umbrella suction zone, soot and soot hazards, sucked air, candle, free space zone, volume concentration of hazards, candlestick, temple, worship hall, microclimate, decoration, hot-wire anemometer, coordinator, micromanometer*

Предлагаемые методика и программа, разработанные для проведения исследований на лабораторном стенде, предусматривают получение экспериментальных данных для доказательства эффективности применения вытяжных зонтов для улавливания и удаления вредностей (копоть, сажа, теплота, влага и углекислый газ), выделяющихся при сгорании церковных свечей в залах богослужения в православных культовых сооружениях. Предлагаемая авторами методика аэродинамических исследований применяется впервые, не имеет аналогов и направлена на определение значений скорости ( $V_{oc}$ , м/с,  $V_{cp}$ , м/с,  $V_{сп}$ , м/с) и температуры ( $t_{сп}$ , °С,  $t_{oc}$ , °С,  $t_{cp}$ , °С) воздушного потока в зоне поперечного сечения всасывающего отверстия зонта в зависимости от количества всасываемого зонтом воздуха ( $L_{вз}$ , м<sup>3</sup>/ч), высоты свободного пространства между нижней кромкой зонта и столешней подсвечника ( $h_{сп}$ , м) и температуры охлажденного всасываемого потока (стока) ( $t_{ст}$ , °С) над открытым пламенем при разном количестве размещенных свечей на столешне подсвечника.

Данные, полученные при разных значениях  $V_{oc}$ , м/с,  $V_{cp}$ , м/с,  $V_{сп}$ , м/с,  $L_{вз}$ , м<sup>3</sup>/ч,  $h_{сп}$ , м,  $t_{сп}$ , °С,  $t_{ст}$ , °С,  $t_{oc}$ , °С,  $q_{сп}$ , г/м<sup>3</sup>, позволяют построить профили скоростей и температуры всасываемого и конвективного потока в его поперечном сечении в зоне свободного пространства и внутри зонта, в зоне подтекания (стока) к охлаждающему конвективному потоку воздуха из окружающей среды помещения.

Экспериментальные исследования проводились в интервалах  $h_{сп}$ , м, через каждые 0,1 м в различных пределах 0,3 м, 0,4 м, 0,5 м,  $L_{вз}$ , м<sup>3</sup>/ч, от 100 до 500 м<sup>3</sup>/ч и  $t_{сп}$ , °С,  $t_{ст}$ , °С,  $t_{oc}$ , °С в зависимости от размещения свечей на столешне подсвечника в количестве 25 %, 50 %, 100 % от общего числа установочных мест (50 шт.). Данные интервалы приняты с учетом получения воспроизводимых измерений рассмотренных выше параметров.

Для проведения экспериментальных аэродинамических и технологических исследований авторами впервые разработан и апробирован экспериментальный стенд, который обеспечивает условия, максимально приближенные к действительным аэродинамическим и технологическим процессам работы вытяжного зонта в системе местной вытяжной вентиляции для улавливания и удаления вредностей при сгорании церковных свечей в зале богослужения православных соборов и храмов.

В процессе исследований температура и относительная влажность воздуха в объеме помещения измерялась с помощью аспирационного психрометра Ассамана: температура с точностью  $\pm 0,2$  °С, а относительная влажность воздуха  $\pm 0,5$  % (рис. 1).

Температура внутреннего воздуха дублировалась термоанемометром типа Testo 440 с точностью  $\pm 0,1$  м/с (рис. 2).

Измерения скорости воздуха в открытом пространстве в зоне всасывания (стока) и внутреннем пространстве зонта производились термоанемометром типа Testo 440 с точностью  $\pm 0,01$  м/с, а температуры воздуха  $\pm 0,1$  °С, линейные размеры определялись измерительной рулеткой Каучук 5м Энкор  $\pm 1,1$  мм (рис. 3).

Скорость воздуха в воздуховоде измерялась согласно ГОСТ 12.3.018-79 ССБТ с точностью  $\pm 0,01$  м/с с применением измерительного прибора Testo 405-v1 (рис. 4).

Полное давление внутри вытяжного зонта от нижней кромки до его верха измерялось через специальные отверстия, расположенные по высоте с интервалом 5 см, микроанемометром типа ММН 2400 (рис. 5).

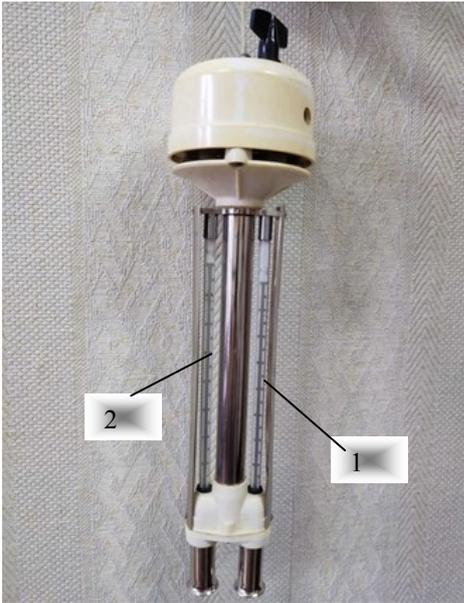


Рис. 1. Аспирационный психрометр Ассамана:  
1 – шкала мокрого термометра;  
2 – шкала сухого термометра



Рис. 2. Общий вид термоанемометра типа Testo 440:  
1 – датчик измерения температуры и скорости воздуха; 2 – демонстрационный экран



Рис. 3. Измерительная рулетка с фиксатором Каучук 5м Энкор

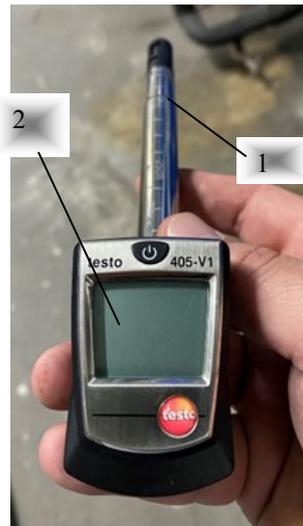


Рис. 4. Общий вид термоанемометра типа Testo 405:  
1 – датчик измерения температуры и скорости воздуха; 2 – демонстрационный экран



Рис. 5. Общий вид микроанемометра ММН 2400

Термоанемометром типа Testo 440 проводились измерения скорости и температуры воздуха в свободном пространстве между нижней кромкой зонта и столешней подсвечника, а также во внутреннем пространстве зонта. При измерении значений скорости и температуры воздуха в каждой конкретной точке в свободном пространстве применялся координатник на колесах для удобства горизонтального перемещения (рис. 6). Координатник использовался при измерении  $t$  и  $V$ , а также для закрепления и размещения на штанге термоанемометра в определенном положении и перемещения его в заданном вертикальном или горизонтальном направлении.

В процессе экспериментов для определения эффективности улавливания вредных (копоти и сажи) вытяжным зонтом в системе вытяжной вентиляции использовался пробоотборник типа «Воздух» ТУ 92-02.01.018 (рис. 7).



Рис. 6. Общий вид координатника:  
1 – штанга; 2 – вертикальная стойка;  
3 – термоанемометр Testo 440;  
4 – каретка на колесах



Рис. 7. Общий вид пробоотборника  
типа «Воздух» ТУ 92-02.01.018



Рис. 8. Общий вид электронных весов  
типа САРТОГОСМ СЕ 124-С

Для взвешивания чистого и загрязненного фильтра применялись электронные весы типа САРТОГОСМ СЕ 124-С (рис. 8). Точность измерения массы фильтра составляла  $\pm 0,0002$  г.

Авторами разработан экспериментальный стенд с удалением загрязненного воздуха через верхнюю часть зонта (рис. 9).

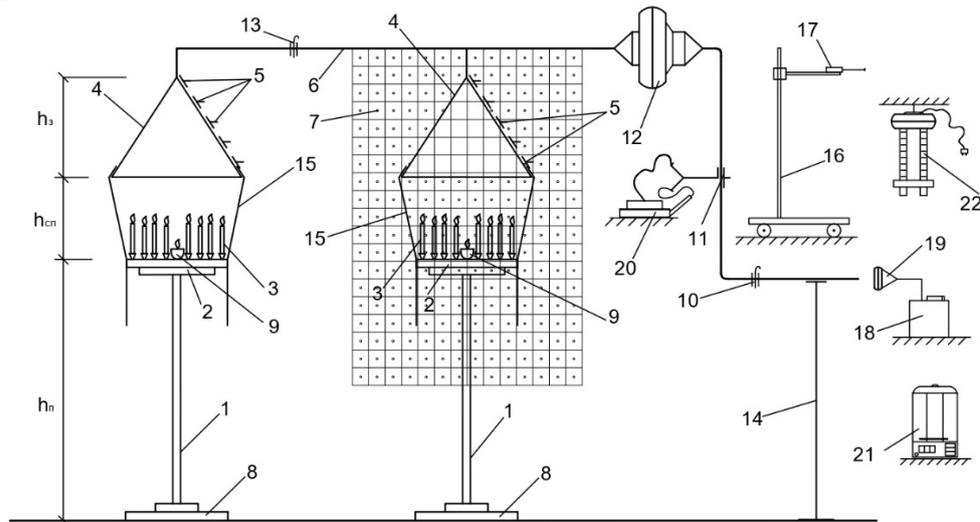


Рис. 9. Экспериментальный стенд системы местной вытяжной вентиляции с удалением загрязненного воздуха с помощью зонтов из верхней зоны:

- 1 – стойка подсвечника; 2 – столешница; 3 – свеча; 4 – вытяжной зонтик; 5 – отверстие для измерения скорости, температуры и полного давления внутри зонтика; 6 – воздуховод; 7 – условная координатная сетка; 8 – основание подсвечника; 9 – лампада; 10 – шибер; 11 – отверстие для измерения скорости воздуха в воздуховоде; 12 – канальный вентилятор; 13 – шибер; 14 – подставка для вентилятора; 15 – крепление вытяжного зонтика со столешней; 16 – стойка координатника; 17 – штанга для крепления термоанемометра; 18, 19 – пробоотборник; 20 – микроанометр с фильтродержателем; 21 – электронные весы, 22 – психрометр

Авторами составлена методика с целью получения на разработанном стенде необходимых экспериментальных данных для теоретического обоснования и практического подтверждения аэродинамических характеристик воздушного потока, удаляемого вытяжным зонтом. На первом этапе исследований в рамках авторской методики подготовлена программа проведения экспериментов для варианта удаления вредных веществ из верхней части зонтика через систему вытяжной вентиляции. В качестве определяющего размера принята скорость воздуха в центре вытяжного отверстия зонтика  $V_{oc}$ , м/с, в зависимости от  $L_{вз}$ , м<sup>3</sup>/ч,  $h_{cp}$ , м,  $t_{ст}$ , °С,  $t_{oc}$ , °С; расстояние от столешни до нижней кромки зонтика  $h_{cp}$ , м, принималось 300 мм, 400 мм, 500 мм.

Данные исследования вначале проводились на экспериментальном стенде без размещения на подсвечнике горящих церковных свечей. При этом температура воздушного потока  $t_{ст}$ , °С, всасываемого зонтом, соответствовала температуре воздуха в помещении  $t_{в}$ , °С, где размещен стенд.

Исследования изучаемых процессов проводились по следующей методике (см. рис. 9):

1. Вначале устанавливалось положение зонта  $h_{сп}$ , м, на минимальном расстоянии 300 мм от уровня столешни 2 до нижней кромки зонта 4 с использованием измерительной рулетки Каучук 5 м Энкор.

2. Включался канальный вентилятор 12, затем производился замер скорости воздуха термоанемометром Testo 440 в круглом воздуховоде 6 диаметром 100 мм. Измерение скоростей воздуха в воздуховоде осуществлялось согласно [1]. Скорость воздуха определялась при трех положениях открытия шиберов (максимальная, средняя, минимальная). Измерение скорости движения воздуха в воздуховоде 6 проводилось на участке шести гидравлических диаметров от шиберов 10. Гидравлический диаметр  $D$  определялся по формуле

$$D = \frac{4F}{\Pi},$$

где  $F$  – площадь сечения воздуховода, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – периметр сечения воздуховода, м.

Координаты и количество точек измерения скоростей фиксировались в 4 местах согласно [1]. Максимальное отклонение координат точек измерений от указанных не превышало  $\pm 10\%$ . Количество измерений скорости воздуха в каждой точке было не менее трех, что соответствовало воспроизводимости опытов. Расход воздуха  $L_{вз}$ , м<sup>3</sup>/ч, в воздуховоде 6 определялся при трех положениях открытого шиберов по формуле

$$L = F \cdot V \cdot 3600,$$

где  $F$  – площадь сечения воздуховода, м<sup>2</sup>;  $V$  – скорость воздуха в воздуховоде, м/с.

3. С использованием координатника (см. рис. 6) и смонтированного на штанге 1 термоанемометра 3 производились измерения  $V_{сп}$ , м/с,  $t_{сп}$ , °С,  $V_{ср}$ , м/с,  $t_{ос}$ , °С,  $V_{ос}$ , м/с, в поперечном сечении воздушной струи, всасываемой зонтом, в точках условной координатной сетки координатника (см. рис. 9) через каждые 10 см, начиная от уровня низа столешни до кромки вытяжного зонта. Измерения значений  $V_{сп}$ , м/с,  $t_{сп}$ , °С,  $V_{ср}$ , м/с,  $V_{ос}$ , м/с,  $t_{ос}$ , °С, выполнялись трижды в каждой координатной точке. Полученные данные заносились в таблицу измерений.

4. Определялась средняя скорость  $V_{ср}$ , м/с, во всасывающем отверстии вытяжного зонта согласно [1]. Величина  $V_{ср}$ , м/с, определялась при трех положениях (максимальная, средняя, минимальная) открытого шиберов 10 (см. рис. 9).

5. Определялась при установочном размере  $h_{сп} = 400$  мм при различных положениях шиберов 10 концентрация копоти и сажи в потоке воздуха, удаляемом из зонта, в конце воздуховода 6 (см. рис. 9). В качестве измерительных приборов использовались пробоотборник и электронные весы.

6. При  $h_{сп} = 400$  мм выполнялись измерения  $t_{сп}$ , °С,  $V_{сп}$ , м/с,  $V_{ср}$ , м/с,  $t_{ос}$ , °С,  $V_{ос}$ , м/с, и концентрации копоти и сажи в удаляемом воздухе при значениях  $h_{сп} = 400$  мм,  $h_{сп} = 500$  мм, аналогично методике пп. 1–5.

7. Проводились измерения  $t_{ос}$ , °С,  $t_{сп}$ , °С,  $t_{ср}$ , °С, на экспериментальном стенде с размещением на столешне подсвечника горящих свечей при разной заполняемости – 25 %, 50 %, 100 %. За счет горящих свечей возникает нагретый восходящий конвективный поток воздуха дополнительно к потоку, всасываемому вытяжным зонтом.

8. Определялись значения  $V_{сп}$ , м/с,  $V_{ос}$ , м/с,  $V_{ср}$ , м/с, и концентрации копоти и сажи в удаляемом воздухе при  $h_{сп} = 300$  мм, 400 мм, 500 мм, при разной заполняемости свечей (25 %, 50 %, 100 %), аналогично методике, изложенной в пп. 1–6.

Для реализации предложенных авторами методики и программы был разработан экспериментальный стенд, не имеющий аналогов, для исследования профилей темпе-

ратурных и скоростных полей, а также концентрации вредных веществ от сгораемых свечей на подсвечниках в зале богослужения православных храмов.

### Список литературы

1. ГОСТ 12.3.018–79 ССБТ. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – М., 1979.
2. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.
3. Боровицкий, А.А. Исследования закономерностей взаимодействия воздушных потоков в вытяжном зонте / А.А. Боровицкий, С.В. Угарова // Актуальные проблемы современного строительства: межвуз. сб. науч. тр. – СПб: СПбГАСУ, 2010. – С.55–58.
4. 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.
5. Еремкин, А.И. Влияние санитарно-гигиенического состояния микроклимата в залах богослужения православных соборов на физиологическое состояние прихожан / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, А.Г. Багдасарян // Образование и наука в современном мире. Инновации – 2020. – № 6. – С. 151–156.
6. Еремкин, А.И. 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 // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1. – С. 195–202.
7. Еремкин, А.И. Совершенствование систем климатического обеспечения комфортных условий и сохранности историко-культурного наследия в православных культовых сооружениях / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, Д.А. Трофимов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 4. – С. 36–45.
8. Еремкин, А.И. Теоретические и экспериментальные исследования по определению массовой концентрации сажи и копоти в воздухе залов богослужения / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1. – С. 81–87.
9. Еремкин, А.И. Комплексное решение локализации загрязнений в процессе сгорания церковных свечей в православных сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2. – С. 104–116.
10. Рогова, Т.Н. Влияние турбулентной диффузии газов на расчет объемов удаляемого воздуха / Т.Н. Рогова // Мир транспорта. – 2006. – № 1. – С. 16–21.
11. Килин, П.И. Расчет и устройство вытяжных зонтов / П.И. Килин, Т.Н. Рогова. – Екатеринбург.: УрГУПС, 2005. – 71 с.
12. Позин, Г.М. Местная вытяжная вентиляция – самый эффективный способ организации воздухообмена в помещении / Г.М. Позин // Инженерные системы. – 2008. – № 3. – С. 40–45.
13. Сотников, А.Г. Теоретически-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции / А.Г. Сотников, А.А. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2. – С. 54–59.
14. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.
15. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.

## References

1. GOST 12.3.018–79 SSBT. Ventilation systems. Methods of aerodynamic tests. – M., 1979.
2. Akhnazarova, S.L. Methods of experiment optimization in chemical technology / S.L. Akhnazarova, V.V. Kafarov. – M.: Higher School, 1985. – 327 p.
3. Borovitsky, A.A. Studies of the laws of interaction of air flows in the exhaust hood / A.A. Borovitsky, S.V. Ugarova // Actual problems of modern construction: interuniversity collection of scientific papers. – SPb: SPbGASU, 2010. – P.55–58.
4. Eremkin, A.I. Method for calculating the air exchange of a displacement air conditioning system in the worship halls of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3. – P. 161–168.
5. Eremkin, A.I. Influence of the sanitary-hygienic state of the microclimate in the worship halls of Orthodox cathedrals on the physiological state of the parishioners / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, A.G. Bagdasaryan // Education and science in the modern world. Innovations – 2020. – No. 6. – P. 151–156.
6. Eremkin, A.I. Theoretical foundations and recommendations for the creation of local exhaust ventilation of candle combustion products in the worship hall / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, V.A. Leontiev, K.A. Petrova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1. – P. 195–202.
7. Eremkin, A.I. Improving the systems of climatic support for comfortable conditions and the preservation of historical and cultural heritage in Orthodox religious buildings / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, D.A. Trofimov // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2021. – No. 4. – P. 36–45.
8. Eremkin, A.I. Theoretical and experimental studies to determine the mass concentration of soot and soot in the air of worship halls / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, A.A. Mishin, A.V. // Mochalov Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1. – P. 81–87.
9. Eremkin, A.I. A comprehensive solution for the localization of pollution during the combustion of church candles in Orthodox buildings / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova, A.A. Mishin, A.V. Mochalov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2. – P. 104–116.
10. Rogova, T.N. Influence of turbulent diffusion of gases on the calculation of volumes of removed air / T.N. Rogova // Mir transporta. – 2006. – No. 1. – P. 16–21.
11. Kilin, P.I. Calculation and arrangement of exhaust hoods / P.I. Kilin, T.N. Rogova. – Ekaterinburg.: UrGUPS, 2005. – 71p.
12. Pozin, G.M. Local exhaust ventilation is the most efficient way to organize indoor air exchange / G.M. Pozin // Engineering Systems. – 2008. – No. 3. – P. 40–45.
13. Sotnikov, A.G. Theoretical and experimental substantiation of the method for optimizing air exchanges in industrial ventilation systems / A.G. Sotnikov, A.A. Borovitsky // Civil Engineering Journal. – 2012. – No. 2. – P. 54–59.
14. Taliev, V.N. Aerodynamic ventilation / V.N. Taliev. – M.: Stroyizdat, 1979. – 295 p.
15. Shepelev, I.A. Aerodynamics of air flows in the room / I.A. Shepelev. – M.: Stroyizdat, 1978. – 144 p.

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

**Королева Тамара Ивановна**,  
кандидат экономических наук,  
профессор кафедры «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: korolevatamara@mail.ru

ПКИТ Московского государственного  
университета технологий и управления им.  
К.Г. Разумовского» (ПКУ)

Россия, 440026, Пенза, ул. Володарского, 6,  
тел.: (8412)56-37-97

**Столяров Даниил Владимирович**,  
специалист Управления по научно-  
исследовательской деятельности  
E-mail:sdv-270401@mail.ru

**Шапошник Данило Степанович**,  
доцент кафедры «Пожарная безопасность»  
E-mail:dan12007@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

*SCIT Moscow State University of Technology  
and Management named after  
K.G. Razumovsky» (PKU)*

Russia, 440026, Penza, 6, Volodarsky St.,  
tel.: (8412)56-37-97

**Stolyarov Daniil Vladimirovich**,  
Specialist of the department for Research  
Activities  
E-mail: scdv-270401@mail.ru

**Shaposhnik Danilo Stepanovich**,  
Associate Professor of the department «Fire  
Safety»  
E-mail:dan12007@yandex.ru

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИФФУЗИОННОГО ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ

Т.И. Королева, Д.В. Столяров, Д.С. Шапошник

Приводятся методы определения концентраций носителей электрического заряда диффузионного гомогенного пламени в стационарном режиме горения при ламинарном течении горючей смеси, а также оценка распределения носителей электрического заряда на плоскости факела пламени в областях его зон – первичной реакционной зоны, зоны внутреннего конуса, вторичной реакционной зоны. Рассмотрена задача о диффузионном пламени при ламинарном течении гомогенной горючей смеси в газовой фазе при коаксиальной подаче пропана и воздуха с равными скоростями.

*Ключевые слова: процессы горения, факел пламени, горючая смесь, ламинарное течение, теплофизические свойства, аналитический метод*

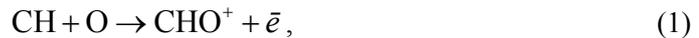
## ANALYTICAL EVALUATION OF MAIN THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF DIFFUSIVE LAMINAR FLAME

T.I. Koroleva, D.V. Stolyarov, D.S. Shaposhnik

Methods are given for determining the concentrations of electric charge carriers in a diffusion homogeneous flame in a stationary combustion regime with a laminar flow of a combustible mixture, as well as an assessment of the distribution of electric charge carriers on the plane of the flame in the areas of its zones (primary reaction zone, inner cone zone, secondary reaction zone). The problem of diffusive flame formation in the case of a laminar flow of a homogeneous combustible mixture in the gas phase under the coaxial supply of propane and air at equal velocities is considered.

*Keywords: combustion processes, flame, combustible mixture, laminar flow, thermophysical properties, analytical method*

На основе работ [1, 2] предполагается, что в первичной реакционной зоне факела пламени, вследствие первичной ионизации, протекает процесс образования первичных ионов  $\text{CHO}^+$  и  $\text{C}_3\text{H}_3^+$  в соответствии со следующими уравнениями реакций:



Наибольшие концентрации ионов были зарегистрированы в области вторичной реакционной зоны факела пламени (фронта пламени). Общие уравнения реакций имеют вид



где  $R_1, R_2, P$  – радикалы и нейтральные молекулы;  $I^+$  – положительно заряженные ионы.

Уравнению (3) соответствует процесс хемоионизации в границах хемилюминесцентной зоны факела пламени, а уравнению (4) – ионно-молекулярные реакции в границах хемилюминесцентной зоны.

Количественная характеристика скорости образования носителей положительного электрического заряда (положительных ионов), а также профилей концентрации положительных ионов может быть дана на основе уравнения

$$\frac{d}{dx} \left( D_a \cdot \frac{dn_{i3}}{dx} \right) - \frac{dn_{i3} v_r}{dx} - \alpha n_{i3}^2 + r_c = 0, \quad (5)$$

где  $D_a$  – коэффициент амбиполярной диффузии,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $v_r$  – локальная скорость течения газовой смеси,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\alpha$  – эффективный коэффициент рекомбинации,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $n_{i3}$  – концентрация ионной компоненты,  $\text{м}^{-3}$ ;  $r_c$  – локальная скорость ионообразования,  $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Уравнение (5) следует из закона сохранения электрического заряда для одномерной системы.

Концентрация ионной компоненты достигает максимума в окрестности точки, соответствующей максимальной температуре факела пламени  $T_{\text{пл max}}$  и расположенной в области вторичной реакционной зоны (фронта пламени)  $n_i \rightarrow n_{i \text{ max}}$ . Кроме того, локальная скорость ионообразования  $r_c$  в области вторичной реакционной зоны также достигает максимального значения  $r_c \rightarrow r_{c \text{ max}}$  и оказывается равной

$$r_{c \text{ max}} = \alpha n_{i \text{ max}}^2. \quad (6)$$

Для вторичной реакционной зоны факела пламени примем также  $n_i = n_{i \text{ max}}, r_c = r_{c \text{ max}}$ .

Для выбора начальных и граничных условий, дополняющих уравнение (5) и необходимых для его численного решения, удобно рассмотреть одномерный случай положения области вторичной реакционной зоны факела пламени на плоскости, в прямоугольной декартовой системе координат: горизонтальная поверхность фронта пламени имеет конечную длину  $L_\phi$  и параллельна оси  $Ox$ , что соответствует стационарному режиму горения гомогенной горючей системы, при этом ширина фронта пламени  $\alpha h_\phi$  бесконечно мала, и соответствующая вертикальная поверхность параллельна оси  $Oy$ . Тогда

$$\text{при } x \rightarrow 0: n_i = n_i^0; r_c = r_{c \text{ max}}; v_r = v_r^0.$$

при  $x \rightarrow +\infty$ :  $\frac{dn_i}{dx} = 0$ ;  $\frac{dv_r}{dx} = 0$ .

Начальная локальная скорость течения газовой смеси  $v_r^0$  в точках, лежащих у основания фронта пламени, рассчитывается по формуле

$$v_r^0 = \sqrt{2 \frac{K_c}{K_c - 1} P_1 V \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K_c - 1}{K_c}} \right)}, \quad (7)$$

где  $K_c$  – показатель адиабаты компонентов горючей системы;  $P_1$  – давление исходных компонентов горючей системы, Па;  $P_2$  – давление продуктов сгорания, Па;  $V$  – объем камеры сгорания горелочного устройства, м<sup>3</sup>.

В настоящей работе рассматриваются процессы, протекающие при сгорании пропановоздушной смеси, т.е. окислителем является кислород воздуха ( $C_3H_8 + O_2$ ). Для расчета показателя адиабаты воспользуемся выражениями для определения молярной теплоемкости при постоянном давлении и молярной теплоемкости при постоянном объеме двухкомпонентной газовой смеси

$$C_{p(c)}^\mu = \frac{\omega_1 G_{m1}}{M_1} \frac{i_1 + 2}{2} R + \frac{\omega_2 G_{m2}}{M_2} \frac{i_2 + 2}{2} R; \quad (8)$$

$$C_{v(c)}^\mu = \frac{\omega_1 G_{m1}}{M_1} \frac{i_1 R}{2} + \frac{\omega_2 G_{m2}}{M_2} \frac{i_2 R}{2}, \quad (9)$$

где  $C_{p(c)}^\mu$  – молярная теплоемкость двухкомпонентной газовой смеси при постоянном давлении, Дж·(моль·К)<sup>-1</sup>;  $C_{v(c)}^\mu$  – молярная теплоемкость двухкомпонентной газовой смеси при постоянном объеме, Дж·(моль·К)<sup>-1</sup>;  $\omega_1, \omega_2$  – массовые доли  $O_2$  и  $C_3H_8$  соответственно, %;  $G_{m1}, G_{m2}$  – удельные массовые расходы  $O_2$  и  $C_3H_8$  соответственно (через поперечное сечение горелочного устройства), кг·с<sup>-1</sup>;  $M_1, M_2$  – молярные массы  $O_2$  и  $C_3H_8$  соответственно, кг·моль<sup>-1</sup>;  $i_1, i_2$  – количество степеней свободы молекул  $O_2$  и  $C_3H_8$  соответственно;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж·(моль·К)<sup>-1</sup>,  $R = 8,31$  Дж·(моль·К)<sup>-1</sup>.

Приняв значение коэффициента избытка окислителя  $\varphi = 0,9$  для горючей смеси и значения молярных масс, количества степеней свободы для  $O_2$  и  $C_3H_8$  соответственно  $M_1 = 0,032$  кг·моль<sup>-1</sup>;  $M_2 = 0,041$  кг·моль<sup>-1</sup>;  $i_1 = 5$ ;  $i_2 = 15,5 \approx 16$ , получим:

$$C_{p(c)}^\mu = 818,02G_{m1} + 169,59G_{m2}; \quad (10)$$

$$C_{v(c)}^\mu = 818,016G_{m1} + 150,75G_{m2}. \quad (11)$$

Тогда показатель адиабаты газовой смеси равен:

$$K_c = \frac{C_{p(c)}^\mu}{C_{v(c)}^\mu} = \frac{818,02G_{m1} + 169,59G_{m2}}{818,016G_{m1} + 150,75G_{m2}}. \quad (12)$$

Подставив выражение (12) в выражение (7), получим после упрощения выражение для  $v_r^0$ :

$$v_r^0 = \sqrt{\left( 1 - \frac{818,02G_{m1} + 169,59G_{m2}}{818,016G_{m1} + 150,75G_{m2}} \right) P_1 V \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1 - \frac{818,016G_{m1} + 150,75G_{m2}}{818,02G_{m1} + 169,59G_{m2}}} \right)}. \quad (13)$$

Для определения концентрации ионной компоненты в областях первичной реакционной зоны и зоны внутреннего конуса факела пламени примем следующие допущения:

1. Процесс горения пропановоздушной смеси протекает адиабатически при объеме  $V = \text{const}$ . Тогда полная внутренняя энергия системы также сохраняется:  $U_c = \text{const}$ . Так как  $U_c = U(T_c; V)$ , то в областях первичной реакционной зоны и зоны внутреннего конуса факела пламени величины  $U_c$  будут иметь различные значения, являясь функцией среднеобъемной температуры  $T_c$  каждой из зон факела пламени. Так, минимальное значение  $U_c$  соответствует области первичной реакционной зоны факела пламени ввиду того, что  $T_c \rightarrow \min$ . Для зоны внутреннего конуса  $U_{c2} > U_{c1}$ ;  $T_{c2} > T_{c1}$ , т.е. зоне внутреннего конуса соответствует среднее значение  $U_c$ . Максимальное значение  $U_c$  соответствует области вторичной реакционной зоны факела пламени:  $U_{c3} > U_{c2}$ ;  $U_{c3} > U_{c1}$ , т.к.  $T_{c3} \rightarrow \max$ .

2. Положим, что энергия, выделяющаяся в результате экзотермической реакции горения пропановоздушной смеси, не распределяется в окружающей факел пламени среде и не сообщается другим системам, а направлена только на ионизацию посредством механизма, описанного выше. Тогда, очевидно, необходимым и достаточным условием для определения процесса ионизации является следующее:

$$U_{\text{л}} \geq W_{i1}, \quad (18)$$

где  $U_{\text{л}}$  – локальное значение внутренней энергии в точке зоны (области) факела пламени, эВ;  $W_{i1}$  – локальное значение энергии активации  $i$ -го процесса ионизации в точке зоны (области) факела пламени, эВ.

Рассмотрим задачу о диффузионном пламени при ламинарном течении гомогенной горючей смеси в газовой фазе при коаксиальной подаче пропана и воздуха с равными скоростями в классической постановке Бурке – Шумана [5]. Расчетно-графическая схема представлена на рис. 1.

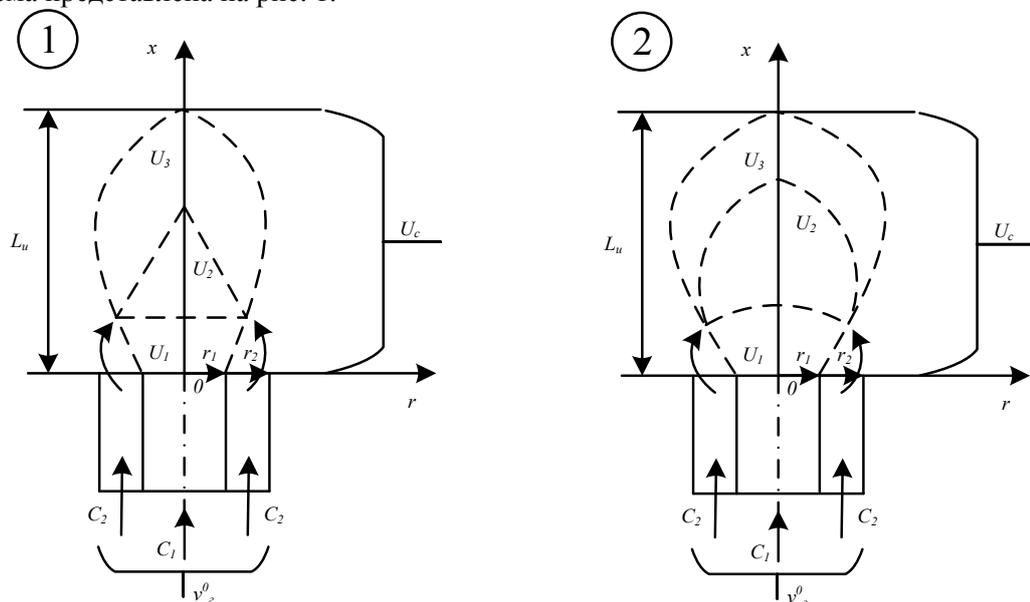


Рис. 1. Схема подачи горючего газа и окислителя в горелочное устройство с учетом формы факела пламени и положения фронта горения в зависимости от значения коэффициента избытка окислителя:

- 1 – форма факела пламени и положение фронта горения при  $\varphi \geq 0,9$ ;
- 2 – форма факела пламени и положение фронта горения при  $\varphi < 0,9$

Дифференциальное уравнение в частных производных на основе стационарного уравнения диффузии в декартовой прямоугольной системе координат на плоскости с учетом начальной скорости течения газовой смеси имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{D}{v_0^2} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right). \quad (19)$$

Начальные и граничные условия к уравнению (19):

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (20)$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=\frac{1}{2}d_2} = 0; \quad (21)$$

$$C|_{x=0}^{r \in [0; 0,5d_1]} = C_1 v; \quad (22)$$

$$C|_{x=0}^{r \in [0,5d_1; 0,5d_2]} = -C_2, \quad (23)$$

где  $C$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – молярные концентрации газовой смеси, пропана и воздуха соответственно на срезе мундштука горелочного устройства (вдоль оси  $-rOr$ ) в начальный момент времени, моль·м<sup>-3</sup>;  $v$  – молярная масса окислителя (воздуха), затрачиваемая на полное сгорание единицы молярной массы горючего газа (пропана), моль;  $d_1$ ,  $d_2$  – внутренний и наружный (с учетом канала подачи окислителя) диаметры мундштука горелочного устройства, м.

Решение уравнения (19) получим методом разделения переменных и запишем в виде ряда функций Бесселя первого рода

$$C(x, r) = (C_1 v + C_2) \frac{d_1^2}{d_2^2} - C_2 + \frac{2d_1}{d_2} (C_1 v + C_2) \times \\ \times \sum_{\xi} \frac{1}{\xi} \frac{J_1(\xi d_1/d_2)}{J_0^2(\xi)} J_0(\xi d_1/d_2) \exp\left(\frac{-4D\xi^2}{v_0^2 d_2^2} x\right), \quad (24)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $\xi$  – корни уравнения  $J_1(\xi) = 0$ ;  $J_0$  – функции Бесселя первого рода нулевого порядка,  $\alpha = 0$ ;  $J_1$  – функции Бесселя первого рода,  $\alpha = 1$ .

На основе (24) вычислим производную  $\frac{\partial C}{\partial r}$ :

$$\frac{\partial C}{\partial r} = \frac{4d_1(C_1 v + C_2)}{d_2^2} \sum_{\xi} \frac{J_1(\xi d_1/d_2)}{J_0^2(\xi)} J_1(\xi d_1/d_2) \exp\left(-\frac{4D\xi^2}{v_0^2 d_2^2} x\right). \quad (25)$$

Рассчитаем теперь величину внутренней энергии гомогенной горючей системы, выделяющейся в факеле пламени вдоль оси  $Ox$ . Количество энергии  $U(x)$ , выделяющейся в элементе  $dx$  участка какой-либо области (зоны) факела пламени, прямо пропорционально потоку вещества через данный участок [4, 5]:

$$U(x) = -r(x) \frac{\partial C(x, r(x))}{\partial r}. \quad (26)$$

Интегрирование уравнения (26) с учетом выражения (25) дает

$$U(x) = \frac{4d_n(C_1v + C_2)}{d_2^2} r(x) \sum_{\xi} \frac{J_1(\xi d_1/d_2)}{J_0^2(\xi)} J_1(\xi 2r(x)/d_2) \exp\left(-\frac{4D\xi^2}{v_0^2 d_2^2} x\right), \quad (27)$$

где  $d_n$  – диаметр основания первичной реакционной зоны факела пламени, м;  $r(x)$ ,  $x$  – точки на поверхности факела пламени, такие, что в их окрестности концентрация  $C_3H_8$ , как недостающего компонента (т.к.  $\varphi = 0,9$ ), обращается в нуль. Следовательно, положение данных точек на плоскости может быть найдено из уравнения  $C_1(x, r) = 0$ .

Величина  $d_n$  в условиях рассматриваемой задачи определяется равенством

$$d_n = d_2 \Leftrightarrow \varphi \in [0,9;1]. \quad (28)$$

На основе (27) в качестве оценки характерной геометрической величины энерговыделения можно принять длину энерговыделения, величина которой определяется следующим выражением:

$$L_u = \frac{v_0^r d_2^2}{4D\xi_1^2}, \quad (29)$$

где  $L_u$  – длина энерговыделения (вдоль оси  $Ox$ ) факела пламени, м.

На рис. 2 представлены аналитические зависимости характерной длины энерговыделения факела пламени и распределения внутренней энергии на плоскости (вдоль осей  $Ox$  и  $-rOr$  соответственно) первичной реакционной зоны, зоны внутреннего конуса и вторичной реакционной зоны факела пламени соответственно.

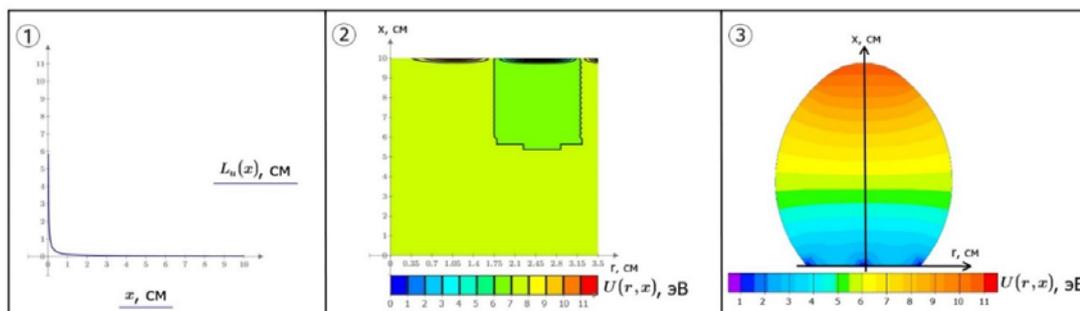


Рис. 2. Аналитические зависимости характерной длины энерговыделения факела пламени и распределения внутренней энергии на плоскости поверхности факела пламени:

1 – аналитическая зависимость характерной длины энерговыделения факела пламени;

2, 3 – аналитические зависимости распределения внутренней энергии на плоскости поверхности факела пламени в стационарном режиме горения пропановоздушной смеси, при  $\varphi = 0,9$  (2 – контурный график функции  $U(r,x)$ ; 3 – визуализация распределения величины внутренней энергии на плоскости поверхности факела пламени);

$$d_1 = 0,01 \text{ м}; d_2 = 0,035 \text{ м}; v_0^r = 0,28 \text{ м} \times \text{с}^{-1}; D = 1,96 \times 10^{-5}; v = 23,8 \text{ моль}$$

Для определения концентраций ионной и электронной компонент в областях первичной реакционной зоны и зоны внутреннего конуса факела пламени, воспользуемся уравнением Саха – Ленгмюра. Рассматривая соответствующие области факела пламени как смесь идеальных газов и предполагая, что в их объеме атомы и молекулы однократно ионизированы, уравнение Саха – Ленгмюра можно представить в виде

$$\frac{n_e^2}{n_0 + n_i - n_e} = \frac{2}{\lambda^3} \frac{g_i}{g_0} \exp\left(-\frac{W_{in}}{K_B T_c}\right), \quad (30)$$

где  $n_e$  – концентрация электронной компоненты,  $\text{м}^{-3}$ ;  $n_i$  – концентрация ионной компоненты,  $\text{м}^{-3}$ ;  $n_0$  – концентрация нейтральной компоненты (примеси),  $\text{м}^{-3}$ ;  $\lambda$  – длина волны де Бройля,  $\text{м}$ ;  $g_i$  – статистический вес иона;  $g_0$  – статистический вес атома;  $K_B$  – постоянная Больцмана,  $\text{Дж}\cdot\text{К}^{-1}$ .

Длина волны де Бройля  $\lambda$  определяется по следующей формуле:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\hbar}{2\pi m_e K_B T_c}}, \quad (31)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\text{Дж}\cdot\text{с}$ ;  $m_e$  – масса электрона,  $\text{кг}$ .

Выразим из уравнения (30) концентрацию электронной компоненты для областей первичной реакционной зоны  $n_{e1}$  и зоны внутреннего конуса  $n_{e2}$  факела пламени соответственно:

$$n_{e1} = \frac{2g_i(n_{01} + n_{i1})e^{-\frac{W_{in1}}{K_B T_{c1}}}}{g_0 \left( \frac{\hbar^2}{2\pi m_e K_B T_{c1}} \right)^{3/2}}; \quad (32)$$

$$n_{e2} = \frac{2g_i(n_{02} + n_{i2})e^{-\frac{W_{in2}}{K_B T_{c2}}}}{g_0 \left( \frac{\hbar^2}{2\pi m_e K_B T_{c2}} \right)^{3/2}}. \quad (33)$$

Аналогично выразим из уравнения (30) концентрации ионной компоненты  $n_{i1}$ ,  $n_{i2}$  и нейтральной компоненты  $n_{01}$ ,  $n_{02}$  (примеси) для областей первичной реакционной зоны и зоны внутреннего конуса соответственно:

$$n_{i1} = \frac{g_0 n_{e1} \left( \frac{\hbar^2}{2\pi m_e K_B T_{c1}} \right)^{3/2} - 2g_i e^{-\frac{W_{in1}}{K_B T_{c1}}} (n_{01} + 1)}{2g_i e^{-\frac{W_{in1}}{K_B T_{c1}}}}; \quad (34)$$

$$n_{i2} = \frac{g_0 n_{e2} \left( \frac{\hbar^2}{2\pi m_e K_B T_{c2}} \right)^{3/2} - 2g_i e^{-\frac{W_{in2}}{K_B T_{c2}}} (n_{02} + 1)}{2g_i e^{-\frac{W_{in2}}{K_B T_{c2}}}}; \quad (35)$$

$$n_{01} = \frac{g_0 n_{e1} \left( \frac{\hbar^2}{2\pi m_e K_B T_{c1}} \right)^{3/2} - 2g_i e^{-\frac{W_{in1}}{K_B T_{c1}}} (n_{i1} + 1)}{2g_i e^{-\frac{W_{in1}}{K_B T_{c1}}}}; \quad (36)$$

$$n_{02} = \frac{g_0 n_{e2} \left( \frac{\hbar^2}{2\pi m_e K_B T_{c2}} \right)^{3/2} - 2g_i e^{-\frac{W_{in2}}{K_B T_{c2}}} (n_{i2} + 1)}{2g_i e^{-\frac{W_{in2}}{K_B T_{c2}}}}. \quad (37)$$

Выполнив совместное решение уравнений (32), (34), (36), а также уравнений (33), (35), (37) в системе и подставив полученные результаты в выражение для начальных условий уравнения (5), получим зависимости распределения концентраций  $n_i$ ,  $n_e$ ,  $n_0$  на плоскости (по координате) с учетом параметров  $T_c$  и  $W_{in}$  (рис. 3) для соответствующих областей факела пламени при сгорании пропановоздушной смеси.

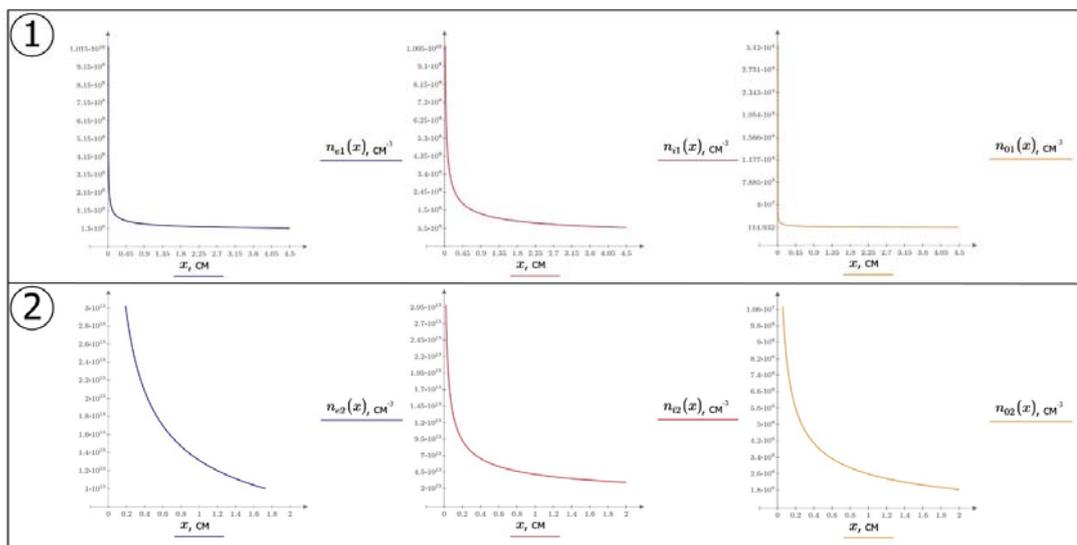


Рис. 3. Аналитические зависимости распределения концентраций  $n_i$ ,  $n_e$ ,  $n_0$  на плоскости (по координате) в областях первичной реакционной зоны и зоны внутреннего конуса факела пламени с учетом параметров  $T_c$  и  $W_{in}$ :

1 – аналитическая зависимость  $n_{i1}(x)$ ,  $n_{e1}(x)$ ,  $n_{01}(x)$  с учетом  $T_{c1}$  и  $W_{in1}$ ;

2 – аналитическая зависимость  $n_{i2}(x)$ ,  $n_{e2}(x)$ ,  $n_{02}(x)$  с учетом  $T_{c2}$  и  $W_{in2}$ ;

$g_0 = 1$ ;  $g_i = 2$ ;  $T_{c1} \in [653,15;773,15]$  К;  $T_{c2} \in [773,15;1073,15]$  К;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг;

$K_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>;  $\hbar = 6,27 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $W_{in1} \in [11,14;11,84]$  эВ;

$W_{in1} \in [1,79 \cdot 10^{-18}; 1,9 \cdot 10^{-18}]$  Дж;  $W_{in2} \in [9,88;10,38]$  эВ;  $W_{in2} \in [1,58 \cdot 10^{-18}; 1,66 \cdot 10^{-18}]$  Дж;

$\varphi = 0,9$

Обратимся к ранее рассмотренному случаю ионообразования в области вторичной реакционной зоны факела пламени. Концентрацию электронной компоненты в данной области факела пламени определим из принципа квазинейтральности плазмы

$$n_{e3} = Zn_{i3}, \tag{38}$$

где  $n_{e3}$  – концентрация электронной компоненты в области вторичной реакционной зоны факела пламени, м<sup>-3</sup>;  $Z$  – кратность заряда ионной компоненты.

Принимая  $Z = 1$ , получаем:

$$n_{e3} = n_{i3}. \tag{39}$$

Оценим также величину напряженности внутреннего (самосогласованного) электрического поля, возникающего в области вторичной реакционной зоны при разделении носителей электрического заряда на величину  $r > r_D$ , где  $r_D$  – радиус Дебая.

Электрическое поле  $\vec{E}_3$  полного разделения носителей электрического заряда в данной области факела пламени удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\text{div}\vec{E}_3 = -4\pi\rho, \tag{40}$$

где  $\rho$  – объемная плотность электрического заряда в области вторичной реакционной зоны, Кл.

Приняв приближенно  $-4\pi r \approx -\frac{\bar{E}_3}{x}$ , получим:

$$E_3 = 4\pi n_e q_e x, \quad (41)$$

где  $q_e$  – электрический заряд электрона, Кл;  $x$  – характерный линейный размер области вторичной реакционной зоны факела пламени, м.

На основе выражения (6) и равенства (39) следует ожидать, что величина напряженности электрического поля полного разделения носителей электрического заряда будет иметь максимальное значение в области вторичной реакционной зоны факела пламени  $E_3 \rightarrow E_{\max}$ .

**Заключение.** В результате проведения теоретического исследования по определению концентраций носителей электрического заряда в зонах диффузионного гомогенного пламени в стационарном режиме горения при ламинарном течении горючей смеси, на основе анализа данных аналитических зависимостей и поставленных в соответствие им работ, выполненных ранее, получены основные выводы:

1. Образование носителей электрического заряда (электронной и ионной компонент) осуществляется во всех зонах факела пламени, причем наиболее интенсивное образование носителей электрического заряда наблюдается в области вторичной реакционной зоны, что следует из аналитических зависимостей, представленных на рис. 2.

2. Минимальная локальная концентрация носителей электрического заряда (как электронной, так и ионной компонент) наблюдается в области первичной реакционной зоны факела пламени, что следует из аналитических зависимостей, представленных на рис. 3.

3. Максимальная локальная концентрация носителей электрического заряда (как электронной, так и ионной компонент) наблюдается в окрестности границы вторичной реакционной зоны факела пламени с внешней средой.

4. Величина выделяемой (изменяемой) внутренней энергии факела пламени распределена в структуре его зон неоднородно: наблюдается возрастание функции  $U(x)$  на интервале  $[0; x]$ , при этом наибольшее значение функция  $U(x)$  имеет в точках, лежащих в окрестности границы вторичной реакционной зоны факела пламени с внешней средой, что следует из аналитической зависимости, представленной на рис. 2. Величина выделяемой (изменяемой) внутренней энергии факела пламени вдоль горизонтальной плоскости поверхности (вдоль оси  $-r \text{ or } r$ ) распределена равномерно: функция  $U(r)$  непрерывна на интервале  $[-r; r]$  в границах каждой зоны факела пламени, что следует из аналитической зависимости, представленной на рис. 2.

5. Факел пламени обладает свойством квазинейтральности при отсутствии внешних воздействий, отклоняющих горючую систему от стационарного режима горения, что следует из аналитических зависимостей, представленных на рис. 1, 3, а также оценки распределения электронной компоненты в области вторичной реакционной зоны факела пламени при стационарном горении пропановоздушной горючей смеси.

Полученные результаты могут быть применены при исследовании систем сгорания газообразных топлив на основе измерения и регистрации собственных электрофизических свойств факела пламени.

#### Список литературы

1. Фиалков, А.Б. Ионный состав пламени пропан-бутан-воздух при пониженном давлении / А.Б. Фиалков, Б.А. Фиалков // ФГВ. – 1985. – №3. – С.32–41.
2. Решетников, С.М. Исследование электрических явлений при горении полимеров / С.М. Решетников, А.А. Фокин // Наука – производство – технология – экология:

сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 5 т. – Киров: Изд-во Вят-ГУ, 2004. – Т. 2. – С.34–36.

3. Фиалков, Б.С. Ионный состав пламени и его связь с температурным полем / Б.С. Фиалков, И.А. Ларионова, А.Б. Фиалков // ФГВ. – 1995. – №6. – С.74–81.

4. Якимов, Н.Д. Моделирование истечения газа через отверстие в длинных трубопроводах, работающих под большим давлением / Н.Д. Якимов, А.И. Хафизова, О.С. Дмитриева, Е.В. Артемьева // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы (г. Самара, 26-29 мая 2020): в 4 т. / Самар. нац.-исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т), Ин-т систем. обраб. изобр. РАН-фил. ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; [под ред. В. А. Соболева]. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2020. – Т. 3. Математическое моделирование физико-технических процессов и систем. – 2020. – С. 683–689.

5. Добрего, К.В. Физика фильтрационного горения газов / К.В. Добрего, С.А. Жданок. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, 2002. – 203 с.

### References

1. Fialkov, A.B. Ionic composition of propane-butane-air flame at reduced pressure / A.B. Fialkov, B.A. Fialkov // FGV. – 1985. – No. 3. – P.32–41.

2. Reshetnikov, S.M. Investigation of electrical phenomena during polymer gorenje / S.M. Reshetnikov, A.A. Fokin // Science – production – technology – ecology: collection of materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference: in 5 vols. – Киров: Publishing House of Vyat-GU, 2004. – Vol. 2. – P.34–36.

3. Fialkov, B.S. The ionic composition of the flame and its relation to the temperature field / B.S. Fialkov, I.A. Larionova, A.B. Fialkov // FGV. – 1995. – No. 6. – P.74–81.

4. Yakimov, N.D. Modeling of gas flow through a hole in long pipelines operating under high pressure / N.D. Yakimov, A.I. Khafizova, O.S. Dmitrieva, E.V. Artemyeva // Information technologies and nanotechnologies (ITNT-2020): proceedings on. Materials of the VI International Conference and Youth School (Samara, May 26-29, 2020): in 4 volumes / Samara National Research. University named after S. P. Korolev (Samara University), In-t systems. processing. isobr. RAS-phil. FNITS "Crystallography and Photonics" RAS; [edited by V.A. Sobolev]. – Samara: Publishing House of Samar. un-ta, 2020. – Vol. 3. Mathematical modeling of physical and technical processes and systems. – 2020. – P. 683–689.

5. Dobrego, K.V. Physics of filtration gorenje gases / K.V. Dobrego, S.A. Zhdanok. – Мн.: Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov NASB, 2002. – 203 p.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 711.523-042.2

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_150

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,*

Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

**Гайдук Альбина Ринатовна,**  
кандидат архитектуры, зав. кафедрой  
«Конструктивно-дизайнерское  
проектирование»

**Сабитов Линар Салихзанович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Конструктивно-дизайнерское  
проектирование»  
E-mail: l.sabitov@bk.ru

**Мирхасанов Рустем Фаритович,**  
старший преподаватель кафедры «Дизайн и  
национальные искусства»  
E-mail: rystem69@mail.ru

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

**Бочарова Юлия Васильевна,**  
старший преподаватель кафедры «Дизайн  
и ХПИ»  
E-mail: iulia1908@mail.ru

*Kazan (Volga Region) Federal University,*

Russia, Kazan, st. Kremlin, d. 18

**Gaiduk Albina Rinatovna,**  
Candidate of Architecture, Head of the  
Department «Structural and Design  
Engineering»

**Sabitov Linar Salikhzanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
Department «Structural Engineering and  
Design»  
E-mail: l.sabitov@bk.ru

**Mirkhasanov Rustem Faritovich,**  
Senior Lecturer of the Deptment «Structural  
Engineering and Design»  
E-mail: rystem69@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

**Bocharova Yulia Vasilievna,**  
Senior Lecturer « Interior Design and Artistic  
Design»  
E-mail: iulia1908@mail.ru

## ОБРАЗНОЕ РЕШЕНИЕ АРХИТЕКТУРНО-ИНЖЕНЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ: БАШНЯ И СВЕТ

А.Р. Гайдук, Л.С. Сабитов, Р.Ф. Мирхасанов, Ю.В. Бочарова

Показана роль композиции как универсальной интегративной константы в исторически сложившихся классических видах изобразительного искусства и дизайна. Отмечено, что следование законам и средствам композиции (формальный подход) позволяет прогнозировать положительный результат, минуя ошибки, разочарования и китчевые тенденции. Подчеркнута важность изучения формальной сферы Наследия в творческих продуктах классиков прошлых эпох и современности.

*Ключевые слова: инженерия, архитектура, башня, свет, пламя, композиция, ритм, модуль, метр*

## FIGURATIVE SOLUTION OF ARCHITECTURAL AND ENGINEERING COMPOSITION: TOWER AND LIGHT

A.R. Gaiduk, L.S. Sabitov, R.F. Mirkhasanov, Y.V. Bocharova

Composition is a universal integrative constant in historically established classical forms of fine art and design. Following the laws and means of composition (formal approach) allows you to predict a positive result, bypassing mistakes, disappointments and kitschy trends. The authors of the article

draw attention to the importance of studying the formal sphere of Heritage in the creative products of classics of past eras and modernity.

*Keywords: engineering, architecture, tower, light, flame, composition, rhythm, module, meter*

С композиционной точки зрения образ любой башни, построенной инженерами и архитекторами, – это всегда искусственно созданный организм (продукт), аналогичный природному объекту. Инженеры и архитекторы, создавая высотное сооружение, башню, подражают высокой горе с олимпийскими или иными богами, пророками на вершине: Олимп, Кайлас, Синай, Арарат с ковчегом Ноя и т.д. Связь «земного» и «небесного» начал происходила в Древнем мире или Средневековье с помощью композиционной вертикали в архитектуре и трансляции огня (дыма). Например, композиционный архитектурный центр (акцент) возводился в виде стелы (пилона), пирамиды, ратуши, храма и т.д.; горел огонь на вершине маяка или дозорной башни, с помощью которой передавались сигналы. Три архитектурных объекта из перечня «семи чудес света» связаны с устремленной ступенчато ввысь пирамидальной формой: Александрийский маяк, пирамиды в Гизе, усыпальница сатрапа Мавсола в Галикарнасе. Условно можно отнести к этому перечню «высоток» и ступенчатые ярусы висящих садов Семирамиды, и облицованную пластинами золота и слоновой кости хрисозлефантинную скульптуру Зевса, сидящего на квадратном в плане троне, и гигантскую статую Афины. Если вспомнить, что в храмах курились благовония, приносились на очаге алтаря жертвы, а любой храм Древнего мира, расположившийся среди глинобитных жилищ обывателей, казался высотным сооружением, то становится понятно, что все семь чудес света были башнями с «огнем и дымом» [3]. Рассмотрим более подробно одну из них.

В 1994 г. французские археологи обнаружили фрагменты древнего маяка на дне Александрийской восточной гавани. Александрийский маяк (известен также как Фаросский маяк) – это башня на острове Фарос, расположенная недалеко от египетского города Александрии (рис. 1). Считается, что башня с горящим на вершине огнем была построена военным инженером, архитектором по имени Сострат Книдский. Это утверждали Плиний Старший, Лукиан и другие. Строительство приходилось на время правления Птолемея II Филадельфа (280-247 до н.э.) [6, 7]. Высота самого знаменитого маяка, построенного в истории человечества, предположительно составляла около 120–150 м. Его характерные черты:

1. Строгость горизонтальных и вертикальных метрических членений.
2. Ярко выраженные горизонтальные и вертикальные композиционные («силовые») линейные ритмы.
3. Декор и украшение представляют собой невысокий плоский рельеф геометрического по своей сути линейного орнамента из квадратных и прямоугольных элементов.



Рис. 1. Изображение маяка на монетах, отчеканенных в Александрии во II веке н.э.

В 48 километрах к юго-западу от Александрии в городе Абусир расположена древняя гробница. Есть основания считать ее уменьшенным в определенном масштабе подобием Александрийского маяка (рис. 2). Арабские путешественники в своих трудах описывали, что основание маяка имеет длину 30 м с каждой стороны. Часть маяка, возвышавшаяся над основанием, имела ширину 16,4 м при диаметре цилиндрического участка 8,7 м. Верхняя часть маяка была диаметром 4,3 м [3].



Рис. 2. Фарос Абусирский, погребальный памятник Абусир и Бург-аль-Араб

В современной архитектуре и дизайне необходимо искать исторические аналоги и думать над образным решением проекта. Рассмотрим современные архитектурно-инженерные решения с точки зрения следования историческим средствам композиции.

Так, современный горящий огонь у высокой стелы (пилона), посвященной погибшим солдатам, – это не только память о Великой Отечественной войне (рис. 3, 4). Горящее пламя и стела создают ассоциативную связь с вечностью. В русле образного ключа стела и пламя всегда рождает аналоги из формальной сферы Наследия. Это и зиккураты, и храмы на их вершинах с горящими благовониями, и культовые постройки Эллады с жертвами богам античности (рис. 5).



Рис. 3. Мемориал памяти Великой отечественной войны: Вечный огонь (скульптор В.М. Маликов)



Рис. 4. Стела «Памяти погибших за советскую власть». Титан. Высота – 30 м. Парк им. Максима Горького, Казань, 1967 г.



Рис. 5. Зиккурат Чока Занбил, Древний Элам. Реконструкция. Макет

Постройки и скульптуры Древнего мира интересны для композиционного анализа в русле развития условного изобразительного языка, образного решения небоскребов США 30-40 гг. XX в. Стилистические особенности ар-деко также используют элементы условного изобразительного языка данных творческих и исторических объектов.

Декоративное искусство ар-деко было построено на синтезе, объединявшем элементы советского конструктивизма, символику джаза, радио, элементы условного языка народного искусства Африки, декора искусства древнего Междуречья. Например, в вершине ступенчатой постройки «Крайслер Билдинг» из «нового Вавилона» 30-х г. XX в. читаются в виде «огненной» подсветки: зубчатый декор построек Месопотамии, спицы автомобильных колес, солярные знаки, а также уходящие в пространство радиоволны (вершина научно-технической мысли той эпохи).

Экстерьер «Крайслер билдинг» легко узнаваем, во многом благодаря светящемуся во тьме декору «короны» в виде окон треугольной формы. Террасами уступов «корона» создает переход от шпиля к параллелепипеду тела башни. Семь расходящихся ступенями вниз и в стороны арок «короны» представляют с конструктивной точки зрения известный в культовой архитектуре Европы крестообразный свод (рис. 6).



Рис. 6. Уильям Ван Аллен. Башня «Крайслер Билдинг», Нью-Йорк

Вся поверхность четырехгранной вершины башни декорирована клепанной сталью «Nirosta» и светится ночью благодаря флуоресцентным лампам, обрамляющим характерные треугольные окна, и разноцветным прожекторам, обращенным к зданию. 120 V-образных оконных проемов освещены сотнями люминесцентных ламп напряжением 480 В. Нержавеющую сталь «Нироста» (немецкий акроним слова nichtrostender Stahl – нержавеющая сталь) для декорирования небоскреба поставляла компания «Krupp» [15].

Здание характеризуется строгими горизонтальными и вертикальными ритмическими и метрическими членениями, которые создают ярко выраженные горизонтальные и вертикальные композиционные («силовые») линейные ритмы.

Элементами декора и украшениями являются инженерные и архитектурные элементы здания. Подсветка здания подчеркивает его детали и элементы, создает декор – украшение в ночное время. Ступенчатая устремленность вверх подчеркивает связь с архитектурой Месопотамии и говорит обывателю, что США – страна с историей, насчитывающей несколько сотен лет, – претендует на мировое господство, как и Ассирия – Вавилон Древнего мира. Элементы декора и украшения: невысокий плоский рельеф геометрического по своей сути линейного орнамента, который многократно повторяет вертикали и горизонтальности постройки, имеющей форму объемной призмы; завершение башни в верхней части в виде «короны» из объемных пирамидальных по форме прямоугольных в плане элементов. Конструкция объемно-пространственной композиции башни собрана из стальных конструкций, бетона и самых маленьких элементов-модулей – кирпичей.

Спасская башня Московского Кремля является смысловым, цветовым и высотным центром Красной площади. Она была создана в 1491 г. итальянским архитектором Пьетро Солари, но только в 1624–1625 гг. ее объемно-пространственная композиция была завершена под руководством английского архитектора Христофора Галовея. В 1937 г. вершины кремлевских башен были украшены рубиновыми звездами, которые пламенеют в ночи, как огни башен Древнего мира. Готические по стилистике своих наверший средневековые башни Московского Кремля стали центром-акцентом для композиционного «отклика-поддержки» высоток Москвы сталинской эпохи (рис. 7).



Рис. 7. Спасская башня Московского Кремля. Рубиновая звезда, пламенеющая в ночи

Металлическая башня в центре Парижа является его символом и архитектурной достопримечательностью. Башня была названа в честь главного конструктора Гюстава Эйфеля, который называл её просто «300-метровой башней». К всемирной выставке 1889 г. в Париже, приуроченной к столетию Великой французской революции, был объявлен конкурс на строительство символа научных и технических достижений Франции. Созданная инженером Эйфелем башня изменила мышление архитекторов всего мира. Так, в Лондоне в 1890 г. был объявлен архитектурный конкурс на строительство объекта, по своей идее близкого башне Эйфеля. Техническое решение 300-метровой металлической конструкции в Париже подстегнуло американских архитекторов строить небоскрёбы, штурмуя высоту, достигнутую башней [13, 14].

Знаменитая башня на Шаболовке (Шуховская башня), представляющая собой комбинацию шести сетчатых секций-гиперболоидов, считается шедевром искусства, науки и техники (рис. 8, 9). Башня признана объектом мирового культурного наследия и является одним из вдохновляющих примеров для архитекторов конца XX в. Декором, «украшением» башни являются сам каркас конструкции, клепки (ок. 80 % крепежа) и болты (20 % крепежных элементов). Таким образом, проявляется главный постулат искусства дизайнера, декларирующий преобладание конструкции, композиции, логики построения (форма) над «украшением», декором (содержание) [9].

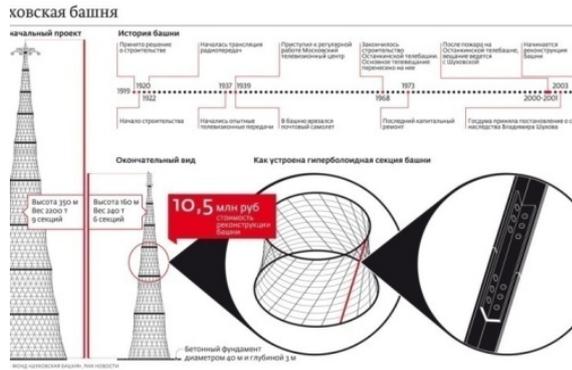


Рис. 8. Проект Шуховской башни (архитектор Шухов В.Г.)



Рис. 9. Шуховская башня в виде арт-объекта

Первая телебашня в мире из железобетона построена в ГДР. Она является прототипом многих башен подобного типа по всему миру (рис. 10). Несмотря на «интернациональную стилистику», башня транслирует своим экстерьером немецкую национальную точность, расчетливость, экономность в деталях и расходных материалах постройки [11].



Рис. 10. Башня инженера Фрица Леонардта (Fritz Leonhardt)

Телевизионная и радиовещательная башня высотой 540,1 м (рис. 11), расположенная в Останкинском районе Москвы, расцвеченная на уровне сегментов в цвета российского государственного флага, превращается в прекрасный арт-объект [2].

Берлинская радиобашня, построенная в 1924–1926 гг., транслирует элементы, характерные для технологичного и динамичного направления в искусстве – ар-деко (рис. 12). Вышка, освещенная в ночное время, является композиционной доминантой и узнаваемым символом германской столицы. Высота башни вместе с антенной составляет 146,78 м, смотровые площадки находятся на высоте 48,1 м, 51,6 м, 121,5 м и 124 м [6].

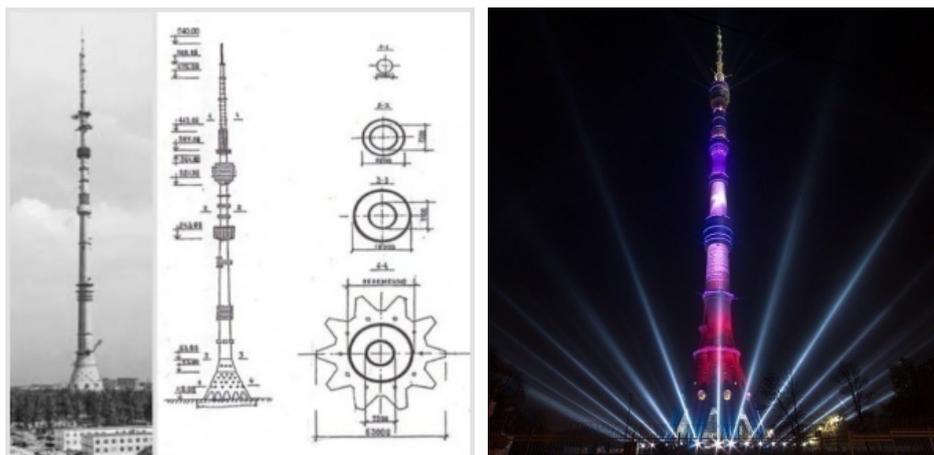


Рис. 11. Останкинская телебашня: архитекторы Л.И. Баталов, Д.И. Бурдин, М.А. Шкуд; Инженеры Н.В. Никитин, Б.А. Злобин, Л. Н. Щипакин



Рис. 12. Берлинская радиобашня. Подсветка в ночное время суток (архитектор Генрих Штраумер)

При общей высоте 279,2 м (916 футов) телевышка – это самое высокое сооружение Гамбурга, состоящее из 204-метровой (670 футов) железобетонной нижней секции, увенчанной 45-метровой (148 футов) стальной решетчатой башней и трехsegmentным цилиндром высотой около 30 м (98 футов) для поддержки антенн (рис.13). Башня отличается строгостью форм, тщательным отбором архитектурных деталей и инженерных элементов, сухим и выверенным рисунком силуэта. Эпоха создания башни совпадает с временем полетов в космос. Наверное, неслучайно, что башня напоминает и ракету и «летающие тарелки». Особенно это бросается в глаза, когда башня подсвечена в ночное время.



Рис. 13. Телевизионная вышка в Гамбурге (1965-1968 гг.). Архитектор Фриц Траутвайн. Инженеры-строители Йорг Шлайх, Рудольф Бергерман и Фриц Леонхардт

Комплекс зданий Всемирного торгового центра в финансовом квартале Манхэттена в Нью-Йорке (США) был спроектирован Минору Ямасаки и официально открыт 4 апреля 1973 года (рис.14). Архитектурной доминантой комплекса были две башни, каждая по 110 этажей – Северная (высотой 417 м, а с учётом установленной на крыше антенны – 526,3 м) и Южная (высотой 415 м). Но символом Нью-Йорка стали именно ночные фотографии башен-близнецов, когда их фасады были освещены светом их многочисленных окон [10]. Башни были разрушены в результате теракта 11 сентября 2001 г. В 2009 г. титул первой башни Всемирного торгового центра перешел к небоскребу, возведенному недалеко от места обрушения. Его высота составляет 542 м (включая 124-метровый шпиль), что делает его самым высоким зданием в западном полушарии.



Рис. 14. Всемирный торговый центр, Нью-Йорк, США, 1973 г.  
(архитектор Минору Ямасаки)

С образной точки зрения объемно-пространственная композиция башни «Лахта Центра» (Санкт-Петербург) напоминает язык пламени из логотипа «Газпрома». По словам главного дизайнера здания Тони Кеттла, «башня спроектирована в форме шпилья с асимметричными краями, чтобы ее можно было рассматривать как уникальную достопримечательность в масштабах города». Композиционным каркасом здания является железобетонный «позвоночник», который возводился с помощью самоподъемной опалубки. Световое решение башни подчеркивает ее конструкцию и экстерьер [12].

Экстерьер поверхности башни «Flame Towers» (Баку) полностью покрыт LED-экранами, транслирующими визуальное движение пламени огня, обозримое с самых дальних точек города (рис. 15). Более 10 000 мощных светодиодных светильников устраивают настоящее световое шоу. Гигантские языки пламени создаются сменой видео-изображений (примерно каждые 2 минуты) [11].

Образное решение башни:

1. Историческое название Азербайджана – «Страна огня». Оно отражает добычу в регионе природного газа и нефти.
2. Поклонники зороастризма считали пламя символом божественного (в частности, в Атешгях Баку и Янардаге).
3. На гербе Баку изображены три языка пламени.

Таким образом, название и форма башен – это образ герба города Баку, на котором изображены три языка пламени.



Рис. 15. Башня «Flame Towers», дневной и ночной вид, Азербайджан. Герб города Баку

Считаем, что серьезная аналитическая практика изучения объектов плоскостной (живопись, графика) композиции и хрестоматийно известных примеров объемно-пространственной формальной сферы Наследия необходима студентам вузов художественного, архитектурного, инженерно-дизайнерского циклов. Подобная работа не только интересна и увлекательна, но и полезна в русле изучения образного, ритмического, модульно-метрического членения и структурирования объектов инженерно-архитектурного творчества.

#### Список литературы

1. Брновицкая, А.Ю. Москва. Архитектура советского модернизма 1955–1991 гг.: справочник-путеводитель / А.Ю. Брновицкая, Н.И. Малинин, О.Н. Казакова. – М.: Garage, 2016. – С. 72–75.
2. Дорис, Беренс-Абусейф. Исламская история Александрийского маяка / Дорис Беренс-Абусейф // *Muqarnas*. – 2006. – XXIII. – С. 1–14.
3. Clayton, Peter A. Chapter 7: The Pharos at Alexandria: in *The Seven Wonders of the Ancient World* / Peter A. Clayton; Martin J. Price (eds.). – London: Routledge, 2013. – P. 11.
4. Clayton, Peter A. *The seven wonders of the ancient world* / Peter A. Clayton; Martin J. Price (eds.). – London; New York: Routledge, 1988.
5. Schlaich, Jörg. *Ingenieurbauführer Baden-Württemberg* / Jörg Schlaich, Matthias Schüller. – Bauwerk Verlag, Berlin 1999. – P. 486–488.
6. Mckenzie, Judith. *Architecture of Alexandria and Egypt 300 B.C. A.D 700* / Judith Mckenzie. – Yale University Press, 2007. – P.41.
7. McKenzie, Judith. *The Architecture of Alexandria and Egypt: 300 BC – AD 700* / Judith McKenzie. –Yale University Press, 2011. – P. 42.

8. Мишин, В.П. Металлические конструкции академика В.Г. Шухова / В.П. Мишин. – М.: Наука, 1990. – 112 с.
9. Ruchelman, Leonard I. The World Trade Center: Politics and Policies of Skyscraper Development / Leonard I. Ruchelman. – Syracuse University Press, 1977. – P. 11.
10. Высотные здания. – URL: <http://tallbuildings.ru/ru/ognennyye-bashni-baku> (обращение 09.10.22)
11. Skyscrapers of 2018: Soaring Beyond the Archetypal Crystal Tower. – URL: <https://www.archdaily.com/907723/skyscrapers-of-2018-soaring-beyond-the-archetypal-crystal-tower> (обращение 09.10.22)
12. Тиссандье, Г. Эйфелева башня (La tour Eiffel): Проект. Работы по постройке. Подъемы. Назначение башни: с 34 рисунками, портретом и автографом Г. Эйфеля / Г. Тиссандье. – СПб.: Издание Ф. Павленкова, 1890. – 83 с.
13. Vogel, R.M. Elevator Systems of the Eiffel Tower, 1889 / R.M. Vogel. – Washington, 1961. – P. 32–40.
14. Гарькин, И.Н. Технология проведения ремонтных работ на памятнике, являющемся объектом культурного наследия / И.Н. Гарькин, Н.В. Агафонкина // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 4.
15. Скачков, Ю.П. Модификация метода паттерн к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 4–9.
16. Корягина, С.А. Информатизация управления строительством как основы предотвращения техногенных аварий / С.А. Корягина // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 4. – С. 11–31.
17. Саженко, Д.С. Основы научно-технического сопровождения объектов капитального строительства / Д.С. Саженко, И.Н. Гарькин, М.В. Арискин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 89–95.

### References

1. Bronovitskaya, A.Yu. Moscow. The architecture of Soviet modernism 1955–1991: Handbook-guide / A.Yu. Bronovitskaya, N.I. Malinin, O.N. Kazakova. – М.: Garage, 2016. – P. 72–75.
2. Doris, Behrens-Abouseif. Islamic History of the Lighthouse of Alexandria / Doris Behrens-Abouseif // Muqarnas. – 2006. – XXIII. – P. 1–14.
3. Clayton, Peter A. Chapter 7: The Pharos at Alexandria: in The Seven Wonders of the Ancient World / Peter A. Clayton; Martin J. Price (eds.). – London: Routledge, 2013. – P. 11.
4. Clayton, Peter A. The seven wonders of the ancient world / Peter A. Clayton; Martin J. Price (eds.). – London; New York: Routledge, 1988.
5. Schlaich, Jörg. Ingenieurbauführer Baden-Württemberg / Jörg Schlaich, Matthias Schüller. – Bauwerk Verlag, Berlin 1999. – P. 486–488.
6. Mckenzie, Judith. Architecture of Alexandria and Egypt 300 B.C. A.D 700 / Judith Mckenzie. – Yale University Press, 2007. – P.41.
7. McKenzie, Judith. The Architecture of Alexandria and Egypt: 300 BC – AD 700 / Judith McKenzie. – Yale University Press, 2011. – P. 42.
8. Mishin, V.P. Metal structures of academician V.G. Shukhov / V.P. Mishin. – М.: Nauka, 1990. – 112 p.
9. Ruchelman, Leonard I. The World Trade Center: Politics and Policies of Skyscraper Development / Leonard I. Ruchelman. – Syracuse University Press, 1977. – P. 11.
10. High-rise buildings. – URL: <http://tallbuildings.ru/ru/ognennyye-bashni-baku> (appeal 09.10.22).
11. Skyscrapers of 2018: Soaring Beyond the Archetypal Crystal Tower. – URL: <https://www.archdaily.com/907723/skyscrapers-of-2018-soaring-beyond-the-archetypal-crystal-tower> (accessed 09.10.22).

- 
12. Tissandier, G. Eiffel Tower (La tour Eiffel): Project. Construction work. Ups. Purpose of the tower: with 34 drawings, portrait and autograph of G. Eiffel / G. Tissandier. – St. Petersburg: Edition of F. Pavlenkov, 1890. – 83 p.
13. Vogel, R.M. Elevator Systems of the Eiffel Tower, 1889 / R.M. Vogel. – Washington, 1961. – P. 32–40.
14. Garkin, I.N. Technology of carrying out repair works on a monument that is an object of cultural heritage / I.N. Garkin, N.V. Agafonkina // Bulletin of the Eurasian Science. – 2020. – Vol. 12, No. 2. – P. 4.
15. Skachkov, Yu.P. Modification of the pattern method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.
16. Koryagina, S.A. Informatization of construction management as a basis for preventing man-made accidents / S.A. Koryagina // Stroitelnye materialy i izdeliya. – 2021. – Vol. 4, No. 4. – P. 11–31.
18. Sadenko, D.S. Fundamentals of scientific and technical support of capital construction objects / D.S. Sadenko, I.N. Garkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 89–95.

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

**Раузеев Искандер Зиннурович,**

старший преподаватель кафедры «Дизайн и национальные искусства»

E-mail: rauzeevi@mail.ru

**Мирхасанов Рустем Фаритович,**

старший преподаватель кафедры «Дизайн и национальные искусства»

E-mail: rystem69@mail.ru

**Сабитов Линар Салихзанович,**

доктор технических наук, профессор кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование»

E-mail: l.sabitov@bk.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

**Бочарова Юлия Васильевна,**

старший преподаватель кафедры «Дизайн и ХПИ»

E-mail: iulia1908@mail.ru

Kazan (Volga Region) Federal University

Russia, Kazan, 18, Kremlin St.

**Rauseev Iskander Zinnurovich,**

Senior Lecturer of the Department «Design and National Arts»

E-mail: rauzeevi@mail.ru

**Mirkhasanov Rustem Faritovich,**

Senior Lecturer of the Department «Structural Engineering and Design»

E-mail: rystem69@mail.ru

**Sabitov Linar Salikhzanovich,**

Doctor of Sciences, Professor of the Department «Structural Engineering and Design»

E-mail: l.sabitov@bk.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

**Bocharova Yulia Vasilievna,**

Senior Lecturer of the Department «Interior Design and Artistic Design»

E-mail: iulia1908@mail.ru

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В АРХИТЕКТУРНОЙ РЕНОВАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

И.З. Раузеев, Л.С. Сабитов, Ю.В. Бочарова

Отмечено, что на сегодняшний день реновация промышленных и производственных зданий является одной из актуальных проблем архитектуры. Показано, как с течением времени промышленная архитектура меняет свою изначальную задачу. Представлено несколько проектов реновации бывшего промышленного предприятия.

*Ключевые слова: реновация, модернизация, промышленная архитектура*

## MODERN TRENDS IN ARCHITECTURAL RENOVATION OF INDUSTRIAL ENTERPRISES AND INDUSTRIAL COMPLEXES

I.Z. Rauzeev L.S. Sabitov, Y.V.Bocharova

It is noted that the renovation of industrial buildings is one of the relevant topics. It is shown how, over time, industrial architecture changes its original task. Several renovation projects of the former industrial enterprise are presented.

*Keywords: renovation, modernization, industrial architecture*

Реновация промышленного предприятия или же производственного комплекса предполагает сохранение общего облика здания с упором на изменение его функциональности. Лишь в условиях комплексной реновации неиспользуемых промышленных зданий можно решить ряд проблем, связанных с грамотным заполнением структуры города.

Попробуем разобраться, как можно произвести трансформацию промышленных зданий без разрушения их исторической архитектурной ценности. Поиск правильного баланса между сохранением исторического наследия и модификацией заброшенных промышленных зданий поможет разнообразить городскую архитектуру.

Для того чтобы дать общую характеристику современных тенденций в архитектурной реновации промышленных предприятий и производственных комплексов, обратимся к проектам. Все они имеют индивидуальные особенности, но объединены одной целью – сделать из промзоны жилые апартаменты, при этом многофункциональные. Преимуществом таких сооружений являются высокие потолки и свободная планировка.

Объект нашего исследования расположен на территории бывшей швейной фабрики в Кировском районе г. Казани на ул.Гладилова. Район занимает западную часть города и граничит с центральной частью по двум рекам: Волге и Казанке. Также недалеко находятся старейшие в городе Адмиралтейская, Ягодная и Пороховая слободы.

Район имеет огромное историческое значение: в нем расположено более 90 памятников археологии, культуры и архитектуры. На территории района хозяйственно-экономическую деятельность ведут множество крупных и малых предприятий (рис. 1).

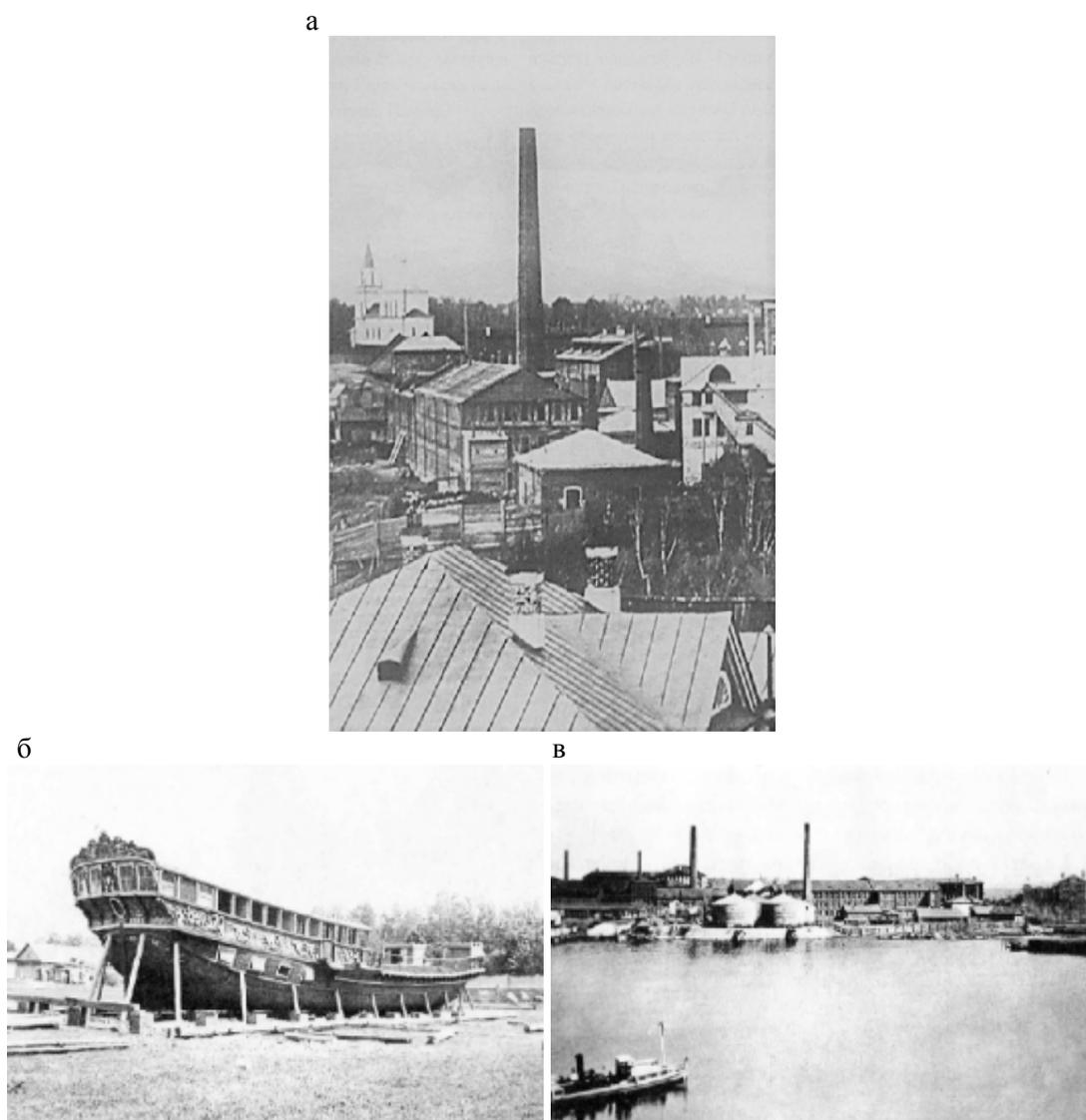


Рис. 1. Кировский район г. Казани в середине в XIX – начале XX века

На улице Гладилова находится огромное количество промышленных предприятий. Среди них льнокомбинат, кожевенно-галантерейная и швейная фабрики, уксусный завод, фабрика первичной обработки шерсти. До революции улица официально называлась Архангельской. Однако чаще всего ее называли Алафузовской, потому что полновластным и безраздельным хозяином улицы был капиталист-миллионер Алафузов. Улицей Гладилова она стала после революции 1917 года, когда была названа в честь революционера Ивана Гладилова.

В непосредственной близости от объекта нашего исследования уже начаты работы по реновации промышленных территорий под жилищную и общественно-деловую застройку.

Территория бывшей фабрики может стать прекрасным местом для жизни и бизнеса. На территории располагаются два здания, которые условно можно разделить на три корпуса, и внутренний дворик (рис. 2). Первые этажи можно отвести под торговые помещения, а на верхних этажах разместить офисные лофт-пространства различных площадей и конфигураций. Внутренний дворик даёт возможность как побыть в уединении, так и собраться целой компанией для обсуждения планов. Здесь также могут проходить ярмарки, маркеты, концертно-выставочные мероприятия (рис. 3). Схемы реновации и функционального зонирования бывшей промышленной фабрики представлены на рис. 4, 5.

Таким образом, можем увидеть, что после реновации заброшенная промышленная архитектура может кардинально поменять свою составляющую, преобразоваться в офисный центр, отель или же в целый жилой комплекс, которые будут функционировать, тем самым вливаясь новым потоком в жизнь города.

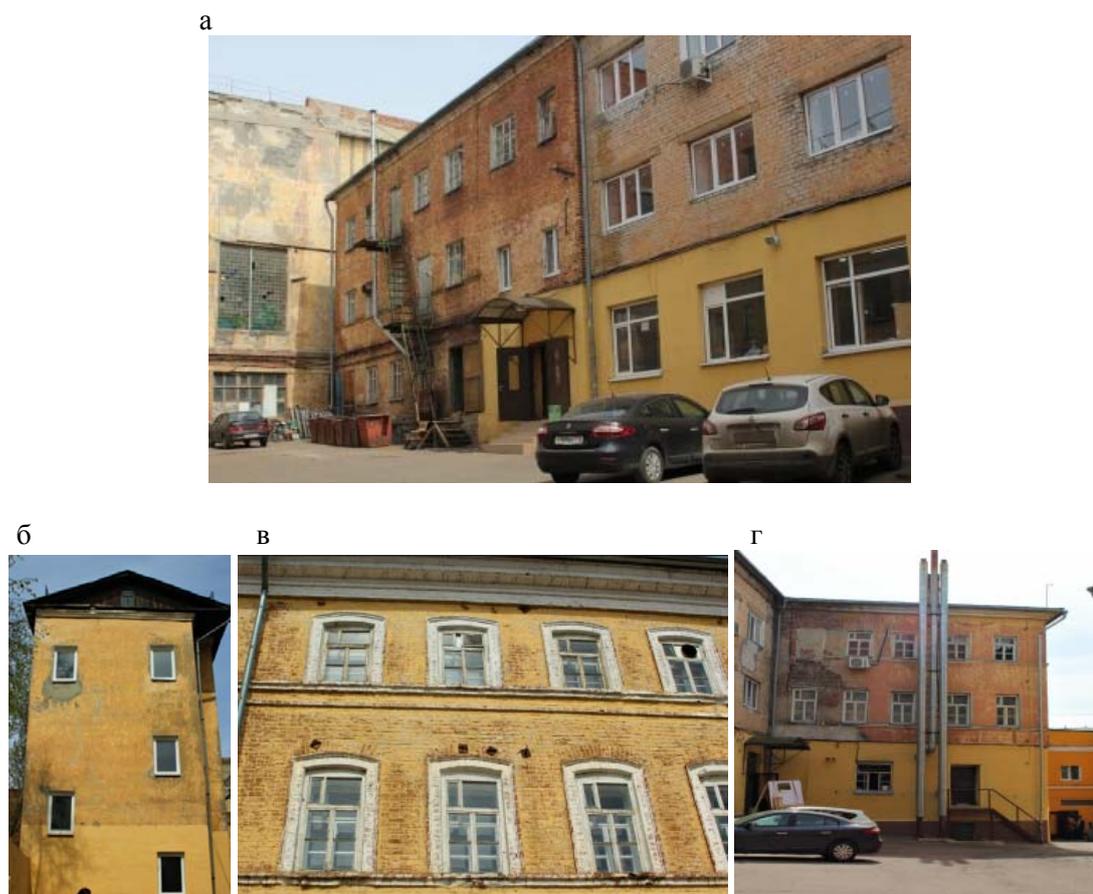


Рис. 2. Фотофиксация текущего состояния объекта

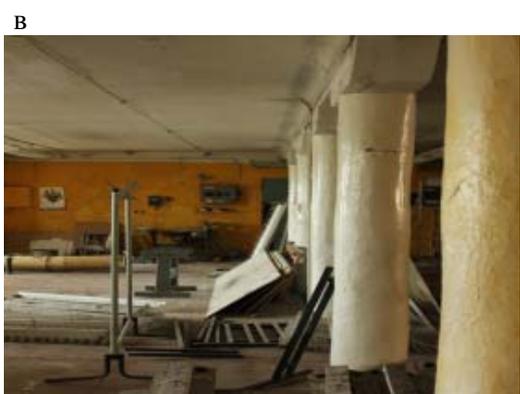


Рис. 3. Фотофиксация текущего состояния внутреннего пространства объекта

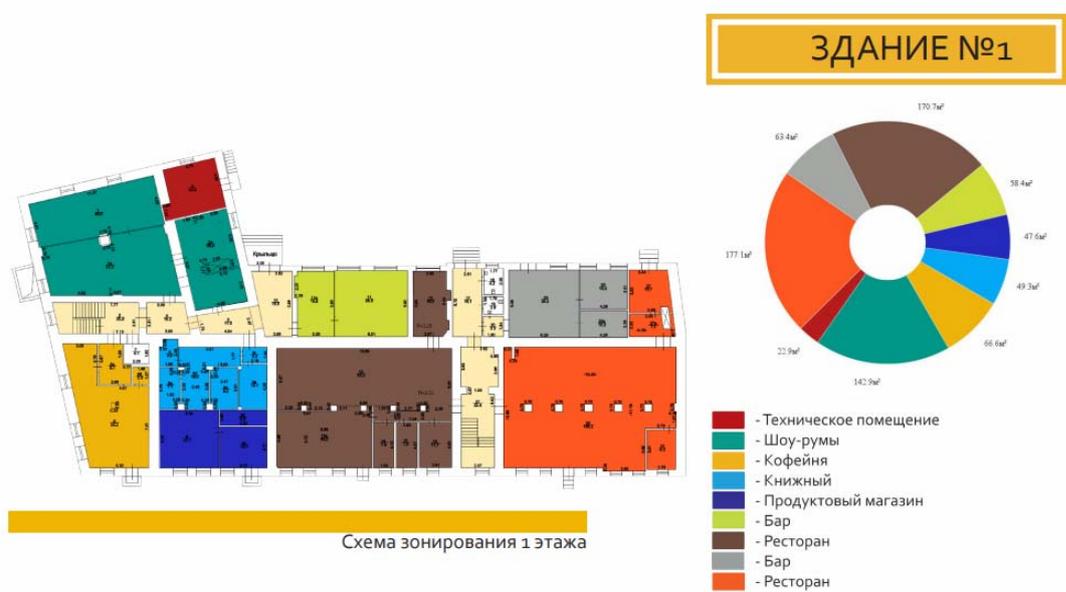


Рис. 4. Схемы функционального зонирования здания №1 (начало)

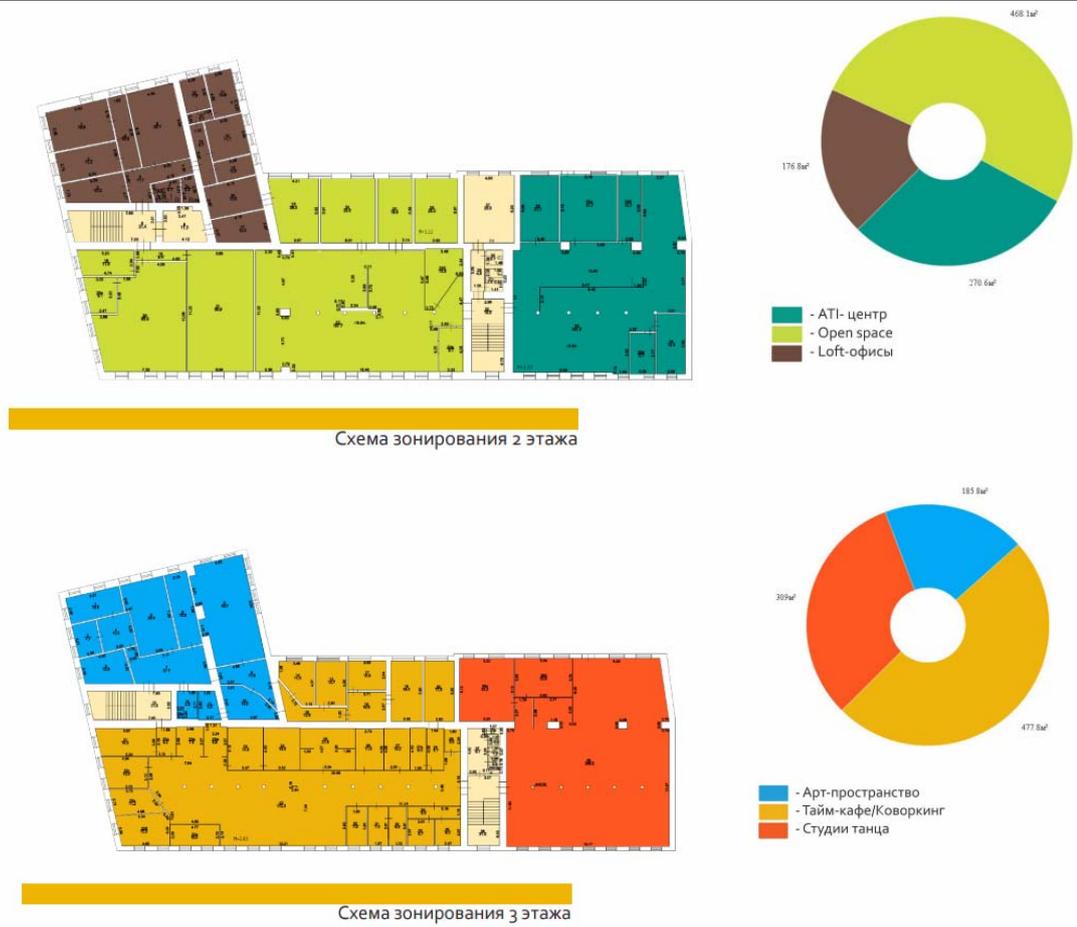


Рис. 4. Схемы функционального зонирования здания №1 (окончание)

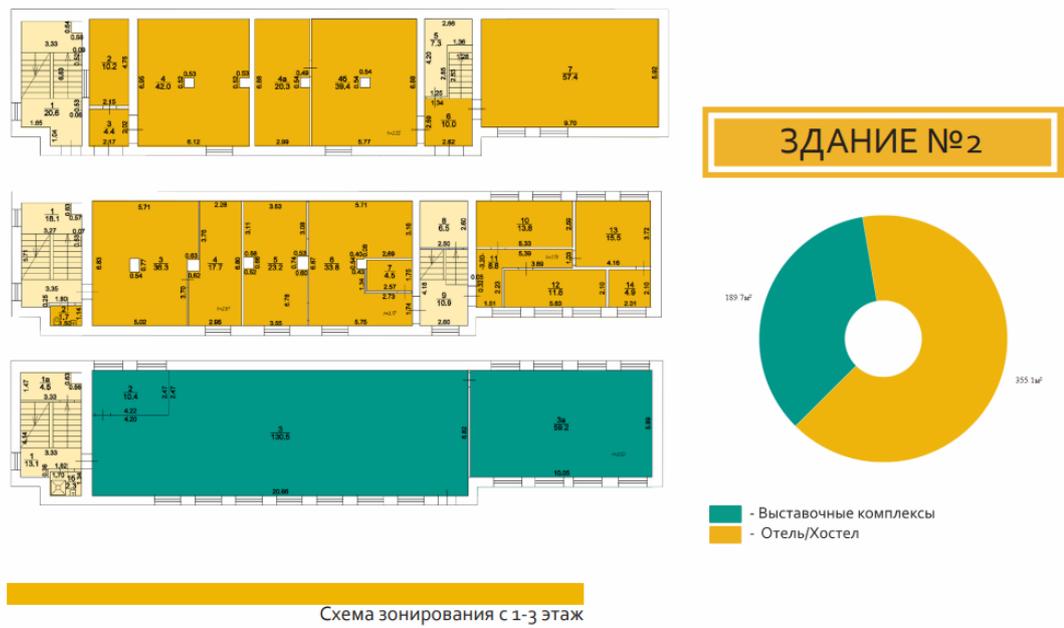


Рис. 5. Схемы функционального зонирования здания №2

Следующим проектом реновации здания швейной фабрики стал барбершоп общей площадью 154 квадратных метра, рассчитанный на посетителей среднего возраста – 25-30 лет. Интерьер выполнен в стиле лофт. Концепция и функциональное зонирование барбершопа представлены на рис. 6, 7.



Рис. 6. Визуализация интерьера барбершопа



Рис. 7. Функциональное зонирование барбершопа

В качестве еще одного проекта реновации здания фабрики Алафузова предложена дизайн-концепция интерьера ресторана. Функциональное зонирование и визуализация интерьера ресторана приведены на рис. 8–10.

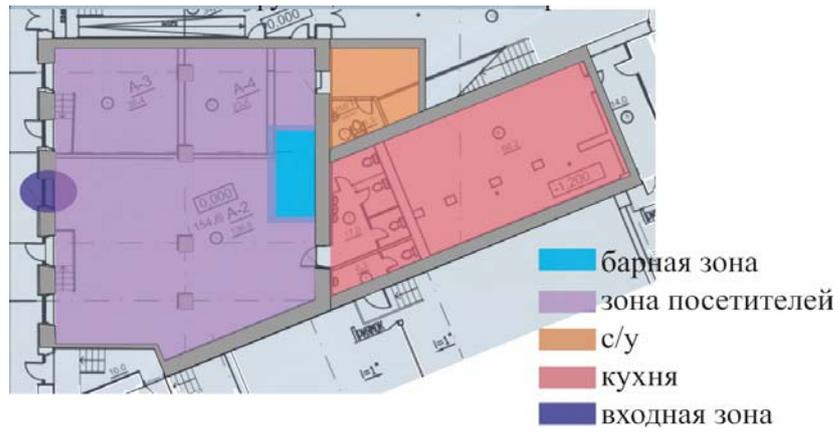


Рис. 8. Функциональное зонирование ресторана



Рис. 9. Визуализация фасада ресторана



Рис. 10. Визуализация интерьера ресторана

Следует отметить, что реновация для каждого объекта происходит по-разному, ведь каждое здание уникально по своему плану и конструкции; также учитывается прилегающая территория, берется в расчет городское окружение. Каждый проект по модернизации промышленных зданий должен не только содержать концепцию, планы, зонирование, но и иметь историческую составляющую, дабы не нарушать городской ритм.

### ВЫВОДЫ

1. Промышленные здания и производственные комплексы позволяют заново прочесть и осмыслить историческую архитектуру, методы и способы, на которые они наталкивают дизайнеров и архитекторов, создающих проекты, связанные с реновацией. Найдя связь между старым зданием и современным городом, можно своей проектной деятельностью раскрыть новую ценность выбранного объекта, претворить проект в жизнь и получить в итоге преобразование, которое создаст идеальный образ видимого будущего архитектуры.

2. Представленное исследование является следующим шагом по осмыслению отечественной культуры реновации промышленных зданий.

3. Переосмысление заброшенных промышленных предприятий может стать новой основой городской структуры, ведь реновация позволит под другим углом взглянуть на образ города, не изменяя его исторической ценности.

### Список литературы

1. Современный опыт реконструкции объектов промышленной архитектуры под здания жилого назначения. – URL: <https://architecturalidea-com.turbopages.org/architecturalidea.com/s/sovremennyj-opyt-rekonstrukcii-obektov/>

2. Основные тенденции современных проектов реновации промышленных зон. – URL: <https://renovaciya5.ru/all/osnovnye-tendentsii-sovremennykh-proektov-renovatsii-promyshlennykh-zon-fundamentalnye-issledovaniya-nauchnyy-zhurnal>

3. Реновация и интеграция промышленных предприятий в современную городскую среду. – URL: <https://research-journal.org/archive/3-81-2019-march/renovaciya-i-integraciya-promyshlennykh-predpriyatij-v-sovremennuyu-gorodskuyu-sredu>.

4. Раузеев, И.З. Социально-психологические (эргономические) аспекты организации пространства современного города / И.З. Раузеев // Проблемы современной науки и образования. – 2013. – № 3 (17). – С. 201–206.

5. Раузеев, И.З. Эргономические аспекты организации пространства современного города / И.З. Раузеев // Научная перспектива. – 2012. – № 12. – С. 108–112.

6. Ишмакова, Л.Р. Медийное городское пространство в современном обществе / Л.Р. Ишмакова, И.З. Раузеев // Культура и цивилизация. – 2018. – Т. 8, № 2А. – С. 227–233.

7. Каракова, Т.В. Художественная перфорация как инструмент формообразования архитектуры общественного здания в контексте эмерджентности системы / Т.В. Каракова, А.В. Данилова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 211–219.

8. Скачков, Ю.П. Модификация метода паттерн к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 4–9.

9. Гарькин, И.Н. Некоторые аспекты технологии проведения реставрации фасада на вновь выявленном объекте культурного наследия / И.Н. Гарькин, Н.В. Агафонкина // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 2 (74). – С. 29–38.

10. Гарькин, И.Н. Технология проведения ремонтных работ на памятнике, являющемся объектом культурного наследия / И.Н. Гарькин, Н.В. Агафонкина // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 4.

1. Modern experience in the reconstruction of industrial architecture objects for residential buildings. – URL: <https://architecturalidea-com.turbopages.org/architecturalidea.com/s/sovremennyj-opyt-rekonstrukcii-obektov/>
2. The main trends of modern projects for the renovation of industrial zones. – URL: <https://renovaciya5.ru/all/osnovnye-tendentsii-sovremennykh-proektov-renovatsii-promyshlennykh-zon-fundamentalnye-issledovaniya-nauchnyy-zhurnal>
3. Renovation and integration of industrial enterprises in the modern urban environment. – URL: <https://research-journal.org/archive/3-81-2019-march/renovaciya-i-integraciya-promyshlennyx-predpriyatij-v-sovremennuyu-gorodskuyu-sredu>.
4. Rauseev, I.Z. Socio-psychological (ergonomic) aspects of the organization of the space of a modern city / I.Z. Rauseev // Problems of modern science and education. – 2013. – No. 3 (17). – P. 201–206.
5. Rauseev, I.Z. Ergonomic aspects of the organization of the space of a modern city / I.Z. Rauseev // Scientific perspective. – 2012. – No. 12. – P. 108–112.
6. Ishmakova, L.R. Media urban space in modern society / L.R. Ishmakova, I.Z. Rauseev // Culture and civilization. – 2018. – Vol.8, No. 2A. – P. 227–233.
7. Karakova, T.V. Artistic perforation as a tool for shaping the architecture of a public building in the context of system emergence / T.V. Karakova, A.V. Danilova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1 (46). – P. 211–219.
8. Skachkov, Yu.P. Modification of the pattern method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.
9. Garkin, I.N. Some aspects of the technology of carrying out the restoration of the facade on the newly identified object of cultural heritage / I.N. Garkin, N.V. Agafonkina // Engineering Bulletin of the Don. – 2021. – No. 2 (74). – P. 29–38.
10. Garkin, I.N. Technology of carrying out repair work on a monument that is an object of cultural heritage / I.N. Garkin, N.V. Agafonkina // Bulletin of the Eurasian Science. – 2020. – Vol. 12. No. 2. – P. 4.

УДК 67.07

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_170

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

**Лапшина Елена Геннадьевна,**  
кандидат архитектуры, профессор,  
зав.кафедрой «Основы архитектурного  
проектирования»  
E-mail: elenlaps@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

**Lapshina Elena Gennadiyevna,**  
Candidate of Science in Architecture,  
Professor, Head of the department  
«Fundamentals of Architectural Design»  
E-mail: elenlaps@mail.ru

## КОНЦЕПЦИЯ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРОДОВ: ДИНАМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ

Е.Г. Лапшина

Представлена авторская концепция архитектурного пространства, которая построена на анализе его динамической составляющей. Архитектурное пространство рассматривается как поле напряжения; основу базового принципа организации пространства в архитектуре и градостроительстве, составляет движение. Рассмотрено движение человека в окружающем его мире: в рамках естественной природы и в условиях развития техногенной среды городов.

*Ключевые слова: город, архитектурное пространство, динамика, поле, видение, действие, тяжесть, смыслы*

## CONCEPT OF ARCHITECTURAL SPACE IN CITIES: THE DINAMIC COMPONENT

E.G. Lapshina

The author's concept of architectural space is given, which is based on the analysis of its dynamic component. Architectural space is seen as a field of tension; the basis of the basic principle of organizing space in architecture and urban planning is movement. The movement of a person in the world around him is considered: within the framework of natural environment and in the conditions of the development of technogenic environment in cities.

*Keywords: city, architectural space, dynamics, field, vision, action, gravity, meanings*

**Введение.** В процессе составления авторской концепции архитектурного пространства была поставлена цель – выявить его динамическую составляющую. Пространство вообще и архитектурное пространство в частности предлагается рассматривать не просто как пустоту, омывающую некую массу (зданий или сооружений) и плещущуюся внутри нее. Именно так трактовал архитектурное пространство А.Габричевский [1], но его формула «форма=масса+пространство» должна быть расширена. Введем характеристики слагаемых архитектурной формы: массу можно сопоставить с фактором устойчивости или структуры, пространство – с фактором гибкости, изменчивости и выделить динамическую основу.

**Материалы и методы.** Предлагаем рассматривать архитектурное пространство как поле. По сути, оно предстает как поле напряжения, создающее потенцию движения человека в окружающем мире. Такой подход предполагает смену парадигмы в архитектуре. Подобная ситуация возникла в биологии, когда при изучении строения человеческого тела физиологи перешли от анатомии к физиологии активности. То есть при исследовании тела человека акцент был перенесен от изучения неподвижного тела, его структуры к описаниям двигательного акта. Рассматривались изменение и

сохранение позы, ходьба и бег как локомоции, синергия сложных движений. Исследовались принципы функционирования организма, структуры двигательного акта.

Далее обратимся к рассмотрению динамики архитектурного пространства городов. Для начала определим понятие «город». Согласно концепции А.Э. Гутнова город должен рассматриваться как живой организм. Это не просто территория, планировкой которой занимаются архитекторы и градостроители. Это не просто застройка территории зданиями и сооружениями, пространственная организация жизни и деятельности населения. По определению А.Гутнова, «город рождается сам, а мы, архитекторы, только принимаем его роды». При этом отмечалось, что город обладает всеми признаками живого организма. Он растет, потребляет и испражняется, рождается и умирает. Таким образом, от формулы «город=территория+население» или «город=место+люди» мы переходим к динамике архитектурного пространства городов. Динамический аспект городского пространства обеспечивается, таким образом, наличием изменчивой составляющей – человеком, движущимся в окружающем его пространстве.

Рассмотрим, каким образом формируется полярность такого архитектурного пространства в городе. При этом архитектурное пространство будет рассматриваться нами именно как поле напряжения.

**Результаты.** Город моделировался в античности и в средневековье как простая механическая система, например город-крепость. Затем его стали рассматривать как сложную систему, модель которой связана с определенной точкой зрения на город архитектора или градостроителя. Сегодня город рассматривается как сложная самоорганизующаяся и саморазвивающаяся система, по отношению к которой моделирующий ее субъект находится внутри [2]. Таким образом, была получена природоподобная модель города. Нами предлагается рассмотреть динамический аспект аналогичной модели, положенный в основу построения авторской концепции. При этом нами выявлено, что основным принципом организации пространства в городе служит движение. Город вмещает множество потоков: люди, машины, информация, энергия и т.п. Мы обратимся к основному потоку – движению масс людей или отдельного человека в его окружении.

#### Архитектурное пространство как поле напряжения

Итак, в современном градостроительстве при анализе городского пространства акцент переносится с территории, застройки, зданий и сооружений, их стен и перекрытий на деятельность людей, населяющих город. Рассматриваются отдельные сообщества, социальные группы: что и как они делают, какие цели ставят и как их достигают. То есть выделяются цели и способы достижения этих целей, пути движения к ним. При этом цель будем рассматривать как некий полюс со знаком «+», человека, который к ней стремится – как полюс со знаком «-». Известно, что каждый человек имеет потребности. Ему необходимы как материальные, так и духовные блага. «Хлеба и зрелищ!» – вот формула глобальной цели в обществе людей, обозначенная еще в античные времена. Причем в принципе не важно, материальная или идеальная составляющая наполняет полюс со знаком «+». Материальная насыщает тело, идеальная питает ум и душу, позволяет получить новую информацию к размышлению, насытиться свежей эмоциональной энергией. По сути, здесь возникает два пространственных уровня: *поле тяжести* и *поле смыслов*. В поле тяжести целью изначально являлось обретение, сотворение кровли. Необходимость поднять, вздыбить материю, чтобы получить укрытие под ней – от непогоды, дождя и снега, пекущего солнца. Эта работа материала под нагрузкой и составляет сущность классического вида архитектурного пространства. В поле тяжести работают два полюса – верх и низ, которые определяются силой тяжести, притяжения. В поле смыслов каждый материальный предмет, пространственный элемент наделялся другими свойствами, получал особое значение. Тогда он становился неким полюсом притяжения – идеалом, к которому стремился человек той или иной культуры. В язычестве, например, это было капище (сакральное место) с идолами, которые получались путем преобразования дерева – украшения его лентами или вырезывания особой маски, личины.

Авторская концепция динамики архитектурного пространства построена на более глубоком погружении в сущность человека и затрагивает прежде всего аспект, связанный с его движением [3]. Гипотеза, которую мы предлагаем рассмотреть, следующая: движение человека определяет форму архитектурного пространства. Одним из аналогов может стать текущая, движущаяся вода, река, которая точит берега. Действительно, если группа людей периодически пересекает поле или луг по одному и тому же пути, то в высокой траве постепенно вытаптывается тропа, которая тоже имеет свои границы.

Рассмотрим, как же движется человек. При этом выделим биомеханическое движение, абстрагируясь на время от движения мысли человека или его эмоций, психики. Учтем два условия, в которых может происходить движение человека: в естественной среде на основе собственных природных данных и в антропогенной, искусственно созданной среде с помощью различных технических приспособлений.

Физиологию двигательной активности человека исследовал Н.Бернштейн [4] в начале XX века. Его работа была инициирована потребностью реабилитации раненных солдат, участников первой мировой войны. Так Николай Бернштейн, изучая движения человеческого тела и систему управления этим движением, стал родоначальником отечественной кибернетики – науки об управлении сложными системами. Физиология активности по сути рассматривает движение человеческого тела как тела любого животного, которое в биологии относится к семейству позвоночных. Нам интересно сравнить этот тип с другим, относящимся к семейству панцирных. Принципиальное отличие этих типов животных друг от друга состоит в том, что мышечный корсет в первом случае надевается на скелет, на костную основу, во втором – находится внутри костной основы. Такое строение порождает и принципиальное различие двигательного акта тел позвоночных и панцирных. Панцирные организмы более устойчивы. Позвоночные – более гибки, но они обладают одной важной особенностью. Так, для построения синхронного движения множества частей тела в этом случае требуется четкое согласование или управление из определенного центра. Таким центром служит головной мозг. Бернштейн показал, как постепенно развивался мозг живого организма в процессе эволюции, как он усложнялся для обеспечения управления все более сложными движениями. Одно дело – движение червя (в теле человека есть такой орган – кишечник, который и сегодня выполняет движения перистальтики), другое дело – движение животного, которое имеет четыре конечности, может ходить и бегать.

В контексте исследования нам было необходимо дать такое длинное отступление, чтобы проанализировать движения нашего современника и показать, что горожане сегодня переходят постепенно в «семейство панцирных», или неких человеко-кентавров. Действительно, человек имеет возможность ездить в автомобиле, колесном транспорте, а не бегать на собственных ногах или перемещаться верхом на другом животном, например лошади. Он может контролировать окружение не только с помощью собственных глаз, ушей, встав вертикально на ноги и поднимая таким образом свой горизонт, расширив поле видения, но и использует для получения информации телефон или компьютер. Это позволяет ему контролировать некое окружение буквально в планетарном масштабе. Подобный «технокентавр» движется по-другому и выстраивает другой мир, другой город.

Попытаемся сравнить пространственные формы, которые выстроены на основе природных, традиционных движений людей, и те, что организованы по принципу технодвижения.

Известно, что классическая архитектура выстраивалась на основе архитектурного ордена. Главным элементом здесь выступает колонна. Ее форма получена как прямая метафора вертикально стоящего человека, который держит на голове тяжесть, «свод небесный». То есть здесь воспроизводится сохранение человеком позы стоя. Самым древним аналогом такого движения стал менгир – вертикально поставленный камень, отмечающий определенное значимое для древних людей место. Поза «ноги на ширине плеч» – прямой аналог арки. Арки моста очерчивают «прыжок» через препятствие. Если рассматривать движение людей в танце, то хоровод можно сопоставить с про-

странственной формой такого мегалитического сооружения, как кромлех. Поза «свернуться калачиком» выражает движение «спрятаться», это же происходит, по сути, в случае выстраивания лабиринта улиц средневекового города. В нем действительно можно было спрятаться и затеряться, спасаясь от врага, ворвавшегося на территорию города. Совсем по-другому выстроено пространство храма, где надо беспрепятственно пройти от входа к алтарю – главному месту сакрального пространства. Неф или галереи организованы по тому же принципу, что и традиционный танец с движением «ручеек». Здание храма с его вертикальным силуэтом становится доминантой и значимым ориентиром в пространстве исторического города.

Обратимся к движению людей в современном городе. Если человек пользуется автоматическими технически усовершенствованными средствами управления движением, это увеличивает скорость передвижения. Скоростной режим требует другого пространства. Так выстраиваются автомагистрали и многоуровневые развязки. Вертикальные здания, небоскребы стали появляться после изобретения лифта и его скоростной модификации. В деловом районе каждого крупного города вырос целый массив небоскребов, превратившись в трехмерный лабиринт. Здесь вертикальной доминантой служит уже не отдельная башня, а весь массив небоскребов в целом и только на больших расстояниях. В огромных зданиях появляются суперпорталы. В них уже нельзя просто войти, как в дверь храма, заглянуть, как в окно дома. Такие пустоты, дыры на фасадах здания, занимающие несколько этажей, можно обозреть лишь в полете на квадрокоптере, например. Наконец, технологии строительного производства позволяют создавать на поверхности морей и океанов целые города-острова.

Таким образом, можно утверждать, что различные движения человека формируют архитектурное пространство соответствующего типа. Исторические города выросли на основе природных способностей людей, отражая их естественные движения. Современные города выстраиваются для движения «технокентавра». И вопрос встает уже о том, что назревает необходимость вернуть людям их человеческую природу, создать города для пешеходов или хотя бы пешеходные зоны в исторических центрах городов.

#### Границы архитектурного пространства

В движении по городу целые массы людей настроены преодолевать пространство. Понятие пространства не столь давно вошло в архитектурные трактаты. В начале XX века новая архитектурная школа, выросшая на волне искусства авангарда, рассматривала понятие «пространство» наряду с понятиями «объем», «цвет» и т.д. Пространство оказалось самым загадочным. Ректор Московского архитектурного института Фаворский тогда писал, что споры шли долго, но единственное, что удалось установить, состоит в следующем. Пространство – это то, что соединяет, и то, что разъединяет. Этот принцип до сей поры проповедуется в Московском архитектурном институте. Рассматриваются пространственные единицы, из которых состоит здание или город, их связи и границы. Связь пространственных элементов рассматривал в своем научном исследовании М. Шубенков [5] при определении структуры архитектурного пространства. Им были выделены такие схемы, как «гребень», «ромашка» и т.д.

Отметим, что сам способ получения неких пространственных единиц может быть разным. Флоренский П. определил два способа – выемку и насыпь. В первом случае получаем нору, во втором – гору. Эти способы Флоренский относил к любому пространственному искусству, не только к архитектуре. Так, ваятель, высекая из камня статую, отсекает все лишнее, т.е. вынимает материал. Скульптор лепит из глины, набрасывая ее на жесткий каркас, мнет материал, наращивая массу. В архитектуре два указанных способа дают, соответственно, пещеру или пирамиду. Поселение, выстроенное в виде пещер, использует пустоты в грунте, в его массе. Если же лепить дома, мазанки, хижин друг к другу, получится целый ряд массивных объемов, которые в конечном итоге тоже образуют лабиринт улиц, состоящий из пустот – улиц и улочек. Так работает в городском пространстве уже приведенная выше формула «форма=масса+пространство».

Границы служат для разъединения пространственных элементов в городе, обособления зон, которые не должны непосредственно контактировать друг с другом. Рассмотрим проницаемость границ. Выделим два способа проникновения – зрительно (визуально) или механически, если имеется возможность пройти сквозь преграду. Получаем следующую классификацию границ: «стена», «решетка», «кулисы» и «черта», которая может быть буквально изображена на полу или площадке. Первая обеспечивает полную изоляцию, последняя – полную проницаемость. Решетка ограничивает только механическое проникновение, кулисы – только визуальное. По сути, при обсуждении проницаемости границ мы имеем дело с двумя пространственными составляющими, или уровнями: *поле видения* и *поле действия*. В поле видения включена система зрительного восприятия человека, который видит цель. В поле действия – система двигательного аппарата человека, который устремляется к намеченной цели.

Однако если человек имеет возможность использовать не только собственное зрение, но и технические приборы, позволяющие «видеть сквозь стену», пространственное решение снова меняется. Тогда нужно выстраивать границы другого качества. Ведь именно выстраивание границ необходимо людям, чтобы почувствовать себя в безопасности. Пусть даже эта граница – всего лишь веревка, которую путешественник, заночевавший в пустыне, выкладывает вокруг себя. Она спасет, может быть, только от насекомых, которые передвигаются ползком по барханам, но все же эта зыбкая грань позволит усталому телу кратковременный отдых. В заключение заметим, что даже контролируя пространство в планетарных масштабах с помощью новейших информационных каналов, выстроенных на основе современных технологий, человек вряд ли может чувствовать себя в полной безопасности. Пока не получены такие барьеры, которые могут оградить, например, от ядерной угрозы.

Итак, горожанин предстает как некая пространственная единица, полюс со знаком «минус». Он стремится к другому полюсу – со знаком «плюс», который представляет собой другую пространственную единицу в структуре города – определенное место, где сосредоточен, накоплен или выявлен требующийся человеку ресурс.

Однако спустившись на самый низкий уровень рассмотрения человека – уровень движения его тела, нельзя упускать аспект, отличающий его от других представителей животного мира, то есть аспект, собственно делающий человека человеком. Это ментальная составляющая, тот виртуальный мир, который человек выстраивает умозрительно. Тогда мозг, который формировался как инструмент управления движением тела – от простого движения перистальтики червя к сложно организованным трудовым движениям, с использованием инструментов, – начинает выполнять другую функцию. Она связана с созданием вымышленных миров, которые хоть и опираются на материальную основу, однако наделяют материю другими смыслами и образами. И тогда человек движется не просто к театру как зданию; он пытается достигнуть своей мечты, например – встретиться с неким идеальным образом в сценическом пространстве.

Люди во все времена входили в такое идеальное пространство, как в некий параллельный мир. В эпоху новейших технологий погружение в виртуальную реальность становится все глубже. От мистерий и театральных постановок, книг и кино – до компьютерных игр и 3D-видео. Каждый живет в том мире, который ему интересен, необходим. Не получая его в реальности, человек склонен выстраивать его в виде виртуальности. Какой город нужен такому человеку – этот вопрос еще требует ответа. Но не следует забывать о собственной материальной основе, телесности, иначе незаметно для себя человек превращается в другой организм. Он выстраивает вокруг себя другой окружающий мир, по-другому в нем двигаясь и становясь, по существу, другим живым организмом. Тогда возникают другие, качественно отличные от прежних, города.

**Вывод.** Архитектурное пространство города рассматривается как поле напряжения, в котором движется человек.

## Список литературы

1. Габричевский, А.Г. Морфология искусства: монография / А.Г. Габричевский. – М.: Аграф, 2002. – 862 с.
2. Тарасова, Л.Г. Взаимосвязь процессов управления и самоорганизации в развитии крупных городов / Л.Г.Тарасова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2009. – 142 с.
3. Лапшина, Е.Г. Динамические свойства архитектурного пространства: монография / Е.Г.Лапшина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 189 с.
4. Бернштейн, Н.А. Биомеханика и физиология движений / Н.А.Бернштейн // Избранные психологические труды. – 3-е изд., стер. – М.: МПСИ, 2008. – 688 с.
5. Шубенков, М.В. Структурные закономерности архитектурного формообразования / М.В. Шубенков. – М.: Архитектура–С, 2006. – 320 с.

## References

1. Gabrichevsky, A.G. Morphology of art: monograph / A.G. Gabrichevsky. – M.: Agraf, 2002. – 862 p.
2. Tarasova, L.G. Relationship between management processes and self-organization in the development of large cities / L.G. Tarasova. – Saratov: Sarat Publishing House. Univ., 2009. – 142 p.
3. Lapshina, E.G. Dynamic properties of architectural space: monograph / E.G. Lapshina. – Penza: PGUAS, 2014. – 189 p.
4. Bernstein, N.A. Biomechanics and physiology of movements. / N.A. Bernstein // Selected psychological works. – 3-rd ed., ster. – M.: MPSI, 2008. – 688 p.
5. Shubenkov, M.V. Structural patterns of architectural shaping / M.V. Shubenkov. – M.: Architecture–S, 2006. – 320 p.

УДК 691.175

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_176

*Костромская государственная  
сельскохозяйственная академия*

Россия, 156530, Костромская обл.,  
пос.Караваяево, Учебный городок, д. 34

**Шабанов Евгений Сергеевич**,  
аспирант 2-го года обучения,  
архитектурно-строительный факультет  
E-mail: onegin181181@gmail.com

**Титунин Андрей Александрович**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры ТОиЭС  
E-mail: a\_titunin@ksu.edu.ru

*Kostroma State Agricultural Academy*

Russia, 156530, Kostroma region, Karavaevo,  
34, Campus

**Shabanov Evgeniy Sergeevich**,  
second year postgraduate student, Faculty of  
Architecture and Civil Engineering  
E-mail: onegin181181@gmail.com

**Titunin Andrey Aleksandrovich**,  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
E-mail: a\_titunin@ksu.edu.ru

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПАЛУБОК ДЛЯ РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Е.С. Шабанов, А.А. Титунин

Описано применение аддитивных технологий в области реставрации архитектурного наследия. Предложен способ реставрации с использованием 3D-сканирования и 3D-печати.

*Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-сканирование, 3D-печать, реставрация архитектурного наследия, фотограмметрия*

## PROCESS IMPROVEMENT OF FORMWORKS MANUFACTURING FOR RESTORATIONS USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

E.S. Shabanov, A.A. Titunin

The application of additive technologies in the field of architectural heritage restoration is described. Methods of restoration using 3D scanning and 3D printing are proposed.

*Keywords: additive technologies, 3D scanning, 3D printing, restoration of architectural heritage, photogrammetry*

### Введение

До настоящего времени в процессе реставрационных работ применялись очень трудоемкие, дорогие и не дающие большой вариативности методы. В основном они заключались в цепочке работ по устранению дефектов как целых зданий, так и отдельных декоративных элементов. Для проведения замеров необходимы были установка строительных лесов и непосредственный физический контакт с исследуемым объектом, последующие стадии требовали многократных сопутствующих затрат на изготовление опалубок и матриц моделей. Работа над реставрируемым элементом обычно начиналась с изготовления формы и последующей отливки черновой детали, черновую деталь вручную доводили до требуемого состояния и уже с нее изготавливали форму для отреставрированных моделей [1].

С появлением современных технологий лазерного сканирования, фотограмметрии и 3d-печати мы могли бы значительно улучшить несколько этапов реставрационных работ. Принято считать, что применение технологии лазерного сканирования в строительстве взяло свое начало именно в области реконструкции памятников архитектуры. Наряду с наземным лазерным сканированием могут осуществляться различные виды фотограмметрической съемки. Фотограмметрия является технической наукой о

методах определения метрических характеристик объектов и их положения в двух- или трехмерном пространстве по снимкам, полученным с помощью специальных съемочных систем [2]. Фотограмметрия может осуществляться как с земли, так и с использованием квадрокоптеров, что позволяет проводить съемку объектов, располагающихся на большой высоте или в сложной градостроительной ситуации. Так как основным инструментом фотограмметрии являются фотокамеры, метод гораздо более удобен и доступен для широкого применения, чем наземное лазерное сканирование. Итогом съемки являются облако точек, модель и цветные фототекстуры объекта [3].

Таким образом, стандартный этап обмеров может быть автоматизирован с помощью средств наземного лазерного сканирования и фотограмметрии, и это не единственный этап, который может быть подвергнут изменению. Как уже говорилось ранее, процесс реставрации поврежденного элемента требовал большого количества трудозатрат по изготовлению черновых отливок и работы на месте. Так как в результате сканирования получена 3D-модель или облако точек, мы можем продолжить работу с геометрией объекта непосредственно в 3D-редакторах. Исправленная геометрия модели может служить основой для создания опалубок или недостающих частей объекта, напечатанных на 3D-принтере из различных видов пластика.

Аддитивные технологии открывают большое количество возможностей для комбинирования материалов и облегчения реставрационных процессов. На сегодняшний день самой распространенной является FDM-технология, которая заключается в послойном наплавлении пластика, который непрерывно подается по контуру будущей детали через тонкое формовочное сопло.

### Теоретический анализ

С применением современных технологий лазерного сканирования и фотограмметрий, 3D-печати мы могли бы значительно улучшить несколько этапов реставрационных работ. Инновации могли бы быть произведены как на этапе изготовления моделей, так и на этапе снятия форм. С помощью 3D-печати изготовление моделей занимает гораздо меньше времени, а результат всегда можно предсказать заранее. Мы можем точно установить время печати и количество потраченного материала, а также с помощью специализированных программ сразу определить самые уязвимые места повреждений модели и предусмотреть дополнительное армирование.

Для того чтобы еще больше оптимизировать стандартный процесс, мы можем не печатать условную «модель», а сразу перейти к «форме». Таким образом, в последующем мы сможем сэкономить материал и трудозатраты. Но перед тем как напечатать форму на 3D-принтере, необходимо правильно ее спроектировать. Формы-опалубки могут быть изготовлены из различных по жесткости пластиков, а поэтому и общие правила при их проектировании будут сильно различаться [4].

Если опалубки будут напечатаны из жесткого материала, вытащить готовую отливку из них будет крайне сложно, поэтому необходимо делать их составными. Проектировать опалубки из жестких пластиков можно только для простых по геометрии форм, которые могут быть извлечены из опалубок без усилий, простым разбором конструкции.

Если модель должна будет иметь углубления и загибы внутри своей геометрии, печать жесткими материалами невозможна, и следует изготавливать формы опалубки только из гибких пластиков, таких, как TPU и FLEX. Также возможна печать вкладышей и различных крепежных элементов конструкции. Для максимальной экономии времени печати и материала необходимо срезать бесполезные участки форм опалубок. Форма не должна иметь ничего лишнего, при этом она должна быть устойчивой, ведь при заливке в нее гипса или других материалов ей нужно будет сохранять свое положение. Опалубки из гибких материалов могут быть неразборными, так как их модуль упругости достаточно для извлечения из них отливок. Также в конструкции могут быть предусмотрены различные закладные детали и даже армирование стенок стекловолоконной сеткой.

Правильное размещение проекта опалубки на печатном столе тоже играет немаловажную роль. На FDM-принтерах процесс печати идет послойно, поэтому на поверхности формы образуются небольшие горизонтальные бороздки. Для того чтобы форму впоследствии было легче обработать, нужно сразу размещать форму в нужном для конкретного случая направлении.

### Экспериментальная часть

Тестовый образец представлял собой гипсовый барельеф головы льва, заключенный в небольшую круглую рамку. Гипс под воздействием внешних факторов стал хрупким, и форма начала разрушаться, было утрачено более 40 % исходного объема. Поэтому было принято решение воссоздавать не утраченные фрагменты, а весь декоративный элемент целиком, так как основная цель заключалась в демонстрации успешного применения аддитивных технологий, а не в точной реставрации существующей модели.

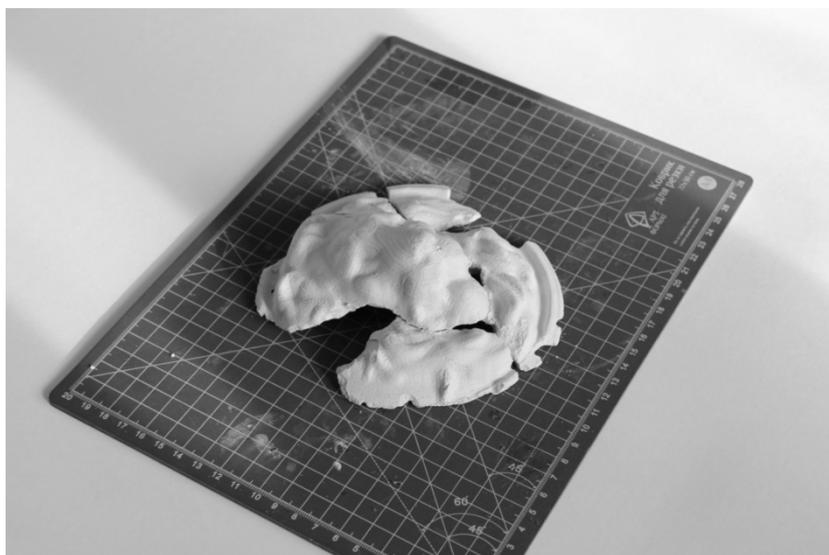


Рис. 1. Гипсовый рельеф головы льва

Для того чтобы провести создание 3D-модели, требовалось выбрать наиболее оптимальный, быстрый и дешевый метод сканирования объектов. Как уже говорилось ранее, фотограмметрия дает достаточно хорошие по качеству результаты при низких трудозатратах. Точность при съемке маленьких по размеру объектов получается довольно высокой, хоть и уступает лазерному сканированию [5]. Поэтому съемка осуществлялась с помощью цифровой зеркальной фотокамеры Canon EOS 2000D. Барельеф был помещен на стол с разметкой для облегчения просчета создания модели, сама съемка проводилась при естественном дневном освещении. Было сделано 65 фотографий с различных ракурсов вокруг объекта, фотографии не должны были оставлять не захваченных участков на теле объекта. Далее результаты были загружены в программу Realty Capture. После обработки были получены полигональная модель и облако точек, которые затем были экспортированы в 3ds max.

Полученная 3D-модель точно воспроизводит все подробности материального оригинала, поэтому нуждается в доработке. На основе ее геометрии мы реконструируем недостающие части объекта, а после сравниваем с оригиналом методом наложения их друг на друга. Так мы полностью воссоздаем первоначальный облик элемента. Неоспоримым плюсом данного этапа является то, что все повреждения декоративного элемента были устранены в цифровой модели и нам не пришлось прибегать к излишним затратам строительных материалов. К сожалению, автоматизировать процесс моделирования новой сетки элемента в 3D-редакторах пока не получается, поскольку детали архитектурных памятников имеют массу индивидуальных особенностей, но в теории можно разработать программное обеспечение, которое

может проводить анализ и дорабатывать модель самостоятельно. Когда моделирование было закончено, наш прототип прошел проверку на отклонение от изначальной формы, и пришло время для проектирования сборной опалубки и ее последующей печати на FDM-принтере.

Для того чтобы впоследствии извлекать готовые детали было удобно, опалубка должна быть разборной, в нашем случае она состоит из двух половин. Также для уменьшения количества потраченного пластика и придания жесткости, кожух опалубки имеет сложную геометрическую форму. Был произведен импорт модели опалубки в слайсер Cura 3D. Cura 3D нарезает 3D-модели. Она переводит 3D-файлы STL или OBJ в формат, который понимает принтер. 3D-принтеры, работающие по технологии FDM (fused deposition modeling – наплавление расплавленной нити), создают 3D-объекты, печатая их послойно. Cura 3D берет 3D-модель, преобразует ее в слои, которые будут выкладываться на рабочий стол, и создает набор инструкций для принтера – как он должен работать слой за слоем. При печати были использованы FDM-принтер Anycubic Vyper и PETG-филамент от компании ESUN.

Финальным этапом работы по воссозданию маскарона льва стала отливка его из гипса. Две части опалубки были надежно соединены друг с другом клейкой лентой, а внутрь был заведен высокопрочный гипс. Высокопрочный гипс ГВВС-16 отличается пределом прочности 16 МПа при изгибе 6 МПа. Степень помола, остаток на сите с размерами ячеек в свету 0,2 мм – не более 1 %. Предел прочности образцов-балочек в возрасте 2 часов – не менее 6 МПа (кгс/см<sup>2</sup>). Сроки схватывания – 4,5-20 мин. Содержание металлопримесей в 1 кг вяжущего – не более 10 мг. Выбор подобного материала характеризуется требованием к большой прочности изделия на изгиб, поскольку опалубки довольно жесткие и снять их можно только с усилием. После извлечения из опалубки отливка будет иметь бороздчатую поверхность, эту проблему можно решить путем дальнейшей доработки изделия или изначальной доработки PETG-опалубки после печати. Существует большое количество способов постобработки, но в данном материале они не рассматриваются, так как не являются целью эксперимента.



Рис. 2. Опалубка из пластика и отливка из гипса ГВВС-16

### Выводы и рекомендации

В приведенном выше материале были разобраны далеко не все возможности, которые аддитивные технологии открывают для задач реставрации. Но мы вполне можем говорить о том, что традиционный подход к реставрации может быть дополнен и улучшен с применением фотограмметрии и использованием 3D-печати. Современный рынок предоставляет большой выбор пластиков, которые могут быть применены в самых разных проектах. Изготовление опалубок удешевляет и ускоряет процесс работ, а возможность их дальнейшей переработки позволяет повторно применять строительные материалы, нанося меньше ущерба окружающей среде.

Фотограмметрический метод, благодаря своим многочисленным преимуществам, является лучшим методом детальной съемки для конструкции сложной формы. Простота и дешевизна в его использовании в ближайшем будущем позволит расширить его применение и сделать его очень востребованным.

Работа с пластиками также будет продолжена в будущем, на данный момент конструкция опалубок нуждается в доработке. Гибкие TPU и FLEX пластики могут заменить PETG, и в таком случае опалубки не придется делать разборными, а процесс извлечения отливок не потребует усилий. Это позволит изготавливать изделия любой, даже самой сложной формы и еще больше упростит процессы проведения работ.

#### Список литературы

1. Сенаторов, Н.Я. Лепные работы / Н.Я. Сенаторов, А.П. Коршунов, Н.Е. Муштаева. – М.: Высшая школа, 1993. – С. 86–95.
2. Обзор современных достижений в фотограмметрии и аэрофотосъемке / И.А. Хабарова, Д.А. Хабаров, И.Д. Яворская, И.Н. Иванов // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. – №. 4-2. – С. 15–33.
3. Богданов, А.Н. Наземное лазерное сканирование в строительстве и BIM-технологиях / А.Н. Богданов, И.А. Алешутин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – №4(46). – С. 326–332.
4. Современная цифровая фотограмметрия / И.А. Хабарова, Д.С. Валиев, В.А. Чугунов, Д.А. Хабаров // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. – №4–2. – С.43–45.
5. Об использовании наземного лазерного сканирования для получения фасадных чертежей исследуемых зданий и строений / И.А. Бушнева, Ю.А. Безверхова, Г.Г. Шевченко, Д.А. Гура // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2016. – Т. 11. – С.89–97.

#### References

1. Senatorov, N.Y. Stucco work / N.Y. Senatorov, A.P. Korshunov, N.E. Mushtaeva. – M.: Higher School, 1993. – P.86–95.
2. Review of modern achievements in photogrammetry and aerial photography / I.A. Khabarova, D.A. Khabarov, I.D. Yavorskaya, I.N. Ivanov // Integral International Journal of Applied Sciences and Technologies. – 2019. – No. 4–2. – P. 15–33.
3. Bogdanov, A.N. Terrestrial laser scanning in construction and BIM technologies / A.N. Bogdanov, I.A. Aleshutin // Kazan: Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2018. – No. 4(46). – P. 326–332.
4. Modern digital photogrammetry / I.A. Khabarova, D.S. Valiev, V.A. Chugunov, D.A. Khabarov // Integral International Journal of Applied Sciences and Technologies. – 2019. – No. 4-2. – P. 43–45.
5. On the use of terrestrial laser scanning to obtain facade drawings of buildings and structures under study / I.A. Bushneva, Yu.A. Bezverkhova, G.G. Shevchenko, D.A. Gura // Electronic network polythematic journal «Scientific works KubGTU». – 2016. – Vol. 11. – P. 89–97.

УДК 728.22:69.059.3:332.012

DOI 10.54734/20722958\_2022\_4\_181

*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

**Смирнова Юлия Олеговна,**  
кандидат экономических наук, доцент  
кафедры «Экспертиза и управление  
недвижимостью»  
E-mail: ulaol@mail.ru

*Национальный исследовательский университет «Московский государственный строительный университет»*

Россия, 129337, Москва,  
Ярославское шоссе, 26,  
тел.+7 (499) 183-44-38

**Грабовый Кирилл Петрович,**  
доктор экономических наук, профессор  
кафедры «Организация строительства  
и управления недвижимостью»

*Penza State University of Architecture and Construction*

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

**Smirnova Yulia Olegovna,**  
Candidate of Economics, Associate Professor  
of the Department «Expertise and Real Estate  
Management»  
E-mail: ulaol@mail.ru

*National Research University «Moscow State University of Civil Engineering»*

Russia, 129337, Moscow,  
26, Yaroslavskoe highway,  
tel.: +7 (499) 183-44-38

**Grabovy Kirill Petrovich,**  
Doctor of Economic Sciences, Professor of  
Department «Organization of construction  
and real estate management»

## СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОЙ РЕНОВАЦИИ В СФЕРЕ СТРОИТЕЛЬСТВА: МЕХАНИЗМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ\*

Ю.О. Смирнова, К.П. Грабовый

Отмечена актуальность формирования стратегии устойчивой реновации в сфере строительства на этапе эксплуатации жилого фонда. Показано, что существующие организационно-экономические разрывы между строительством жилья и его эксплуатацией требуют дополнительных усилий по обеспечению развития бизнес-процессов. Отмечено, что общая концепция устойчивости должна быть применима и к обеспечению стабильной эксплуатации жилого фонда при исходных условиях увеличения стоимости владения и уменьшения капитальных затрат граждан на всех стадиях жизненного цикла.

*Ключевые слова: стратегии, программы, строительство, реновация, концепция устойчивого развития, эксплуатация, энергосбережение*

## SUSTAINABLE RENOVATION STRATEGIES IN THE CONSTRUCTION SECTOR: ENERGY SAVING MECHANISMS\*\*

Yu.O. Smirnova, K.P. Grabovyi

In modern conditions of a turbulent economy the requirements for ensuring the stability of all markets are increasing, including the formation of a strategy for sustainable renovation in the construction industry at the phase of operation of the housing stock. The existing organizational and economic gaps between construction and operation require additional efforts to ensure sustainable development of business processes at the phase of residential real estate operation. Undoubtedly, the

\* Данное исследование выполнено в рамках реализации гранта РФФИ №22-28-20511 «Устойчивое развитие территорий на основе экологоориентированных жизненных циклов объектов капитального строительства в информационных системах как институциональный инструмент экономического роста» (<https://rscf.ru/project/22-28-20511/>).

\*\* This study was carried out as part of the implementation of the RSF grant No. 22-28-20511 «Sustainable development of territories based on environmentally oriented life cycles of capital construction objects in information systems as an institutional tool for economic growth» (<https://rscf.ru/project/22-28-20511/>).

general concept of sustainability should also be applicable to ensuring the stable operation of the housing stock of citizens under the initial conditions of increasing the cost of ownership and reducing capital costs at all stages of the life cycle.

*Keywords: strategies, programs, construction, renovation, sustainable development concept, operation, energy saving*

Концепция устойчивого развития территорий многофакторна. Сегодня применительно к вопросам эксплуатации жилого фонда она определяется существующей проблемной ситуацией, а именно: с одной стороны, наблюдается высокая изношенность зданий, сооружений, а с другой – низкая эффективностью управления процессами реновации, реконструкции и капитального ремонта.

Развитие теории устойчивости, по нашему мнению, требует непосредственного применения ее принципов ко всем процессам реновации жилищного фонда России. Реализация этой цели позволит сформировать инновационное поле энергоэффективности и гармоничности управления с точки зрения эколого-стоимостной ориентации жизненных циклов товаров (работ) и минимизации стоимости владения ими.

Отметим, что наблюдается возрастание стоимости затрат ресурсов на эксплуатацию и содержание жилого фонда и, как следствие, возникает актуальная задача, направленная на снижение стоимости владения жилым фондом.

Формирование концепции устойчивого развития жилищной сферы заключается в действии двух взаимоисключающих тенденций:

- приоритет экономии и сокращение стоимости владения жилой недвижимостью для населения;
- приоритет увеличения требований к качеству выполняемых работ в ходе реновации жилья в части применения энергоэффективных решений и обеспечения экологичности, комплексности, технологичности и инновационности всех мероприятий по воспроизводству жилой недвижимости, что приводит к росту затрат на реновацию и стоимость владения жильем.

Отметим, что концептуальный подход устойчивости реновации жилого фонда необходимо применять ко всем фазам жизненного цикла недвижимости на протяжении полного цикла владения ею и на всех фазах ее эксплуатации. Считаем, что данный подход к решению проблемы реновации жилого фонда является одним из обязательных составляющих общей экономической модели, поскольку ориентирован на развитие всей системы жилищно-коммунального хозяйства страны.

Определим совокупность организационно-экономических механизмов устойчивого развития жилого фонда в виде специализированной кластер-системы владельцев жилой недвижимости, находящейся во взаимодействии с управляющей системой в жизненных циклах владения и реновации объектов жилой недвижимости. Это взаимодействие должно быть ориентировано на приоритетное эколого-стоимостное управление и минимизацию стоимости владения объектами жилой недвижимости как при капитальном и текущем ремонте, так и при выполнении всех процессов реновации жилого фонда.

Предлагаем сформировать комплексный индекс устойчивой эксплуатации жилого фонда через совокупность функциональных подсистем по отдельным направлениям критериальной оценки устойчивости. В наиболее общем виде смоделированы следующие подсистемы: менеджмента системы ЖКХ, энергоэффективности, зелени, экологичности, потребительской ценности и результативности существующих организационно-экономических механизмов регулирования. Итоговая модель структурирования устойчивости реновации в системе ЖКХ, включая авторское структурирование, представлена на рис. 1.

Накопленный к настоящему времени опыт принятия решений о применении того или иного набора технических вариантов, обеспечивающих достижение нормативных показателей энергоэффективности и удельного энергопотребления многоквартирного дома при капитальном ремонте, предполагает рассматривать стоимость жизненного цикла набора технических решений на временном горизонте 30 лет (срок действия

программы капитального ремонта) с учетом прогнозируемого повышения тарифов на энергоресурсы.

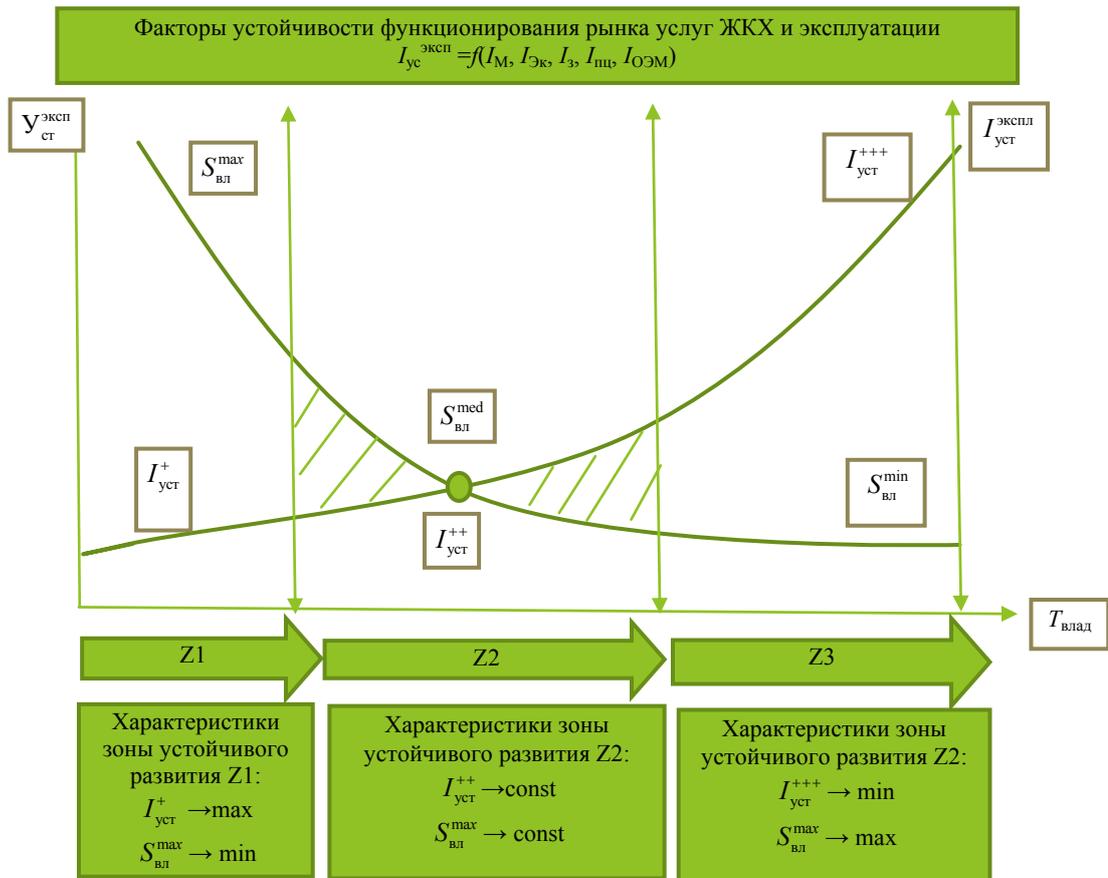


Рис. 1. Авторское концептуальное структурирование моделей устойчивого развития реновации жилого фонда в системе ЖКХ:

$I_y$  – уровень устойчивости развития экологоориентированных жизненных циклов жилой недвижимости системе ЖКХ, %;  $I_M$  – уровень устойчивости функции менеджмента управляющих компаний и ТСЖ. Ее можно интерпретировать как степень устойчивости функционирования управляющих компаний, %;  $I_{Эж}$  – уровень устойчивого развития по степени применения принципов энергоэффективности текущего и капитального ремонта, %;  $I_3$  – уровень устойчивого развития по показателям использования «зеленых» и экологических стандартов эксплуатации, %;  $I_{пц}$  – уровень устойчивого развития по важности обеспечения положительного градиента роста потребительской ценности всех мероприятий и программ реновации по минимизации стоимости владения жилой недвижимостью, %;  $I_{ОЭМ}$  – уровень целевой ориентации существующих (проектируемых) организационно-экономических механизмов государственного и муниципального регулирования устойчивости процессов реновации в системе ЖКХ, %

Оптимизация параметров осуществляется на примере результатов реализации работ по капитальному ремонту. В качестве объекта исследования нами были отобраны многоквартирные жилые дома (МКД) г. Пензы. Реализация предложений по программно-целевому развитию эколого-ориентированного механизма системы устойчивой реновации предполагает разработку прогнозов реализации стандартизированных инвестиционных портфелей. В первую очередь, сделаны прогнозы ситуационной реализации капремонта применительно к стандартизированному инвестиционному портфелю типа А «Экономкласс». Результат такой работы представлен в виде прогнозных моделей (рис. 2) и позволяет осуществить многовариантное зонирование зависимости сроков осуществления капитального ремонта и объемов годовых накоплений от величины платежей.

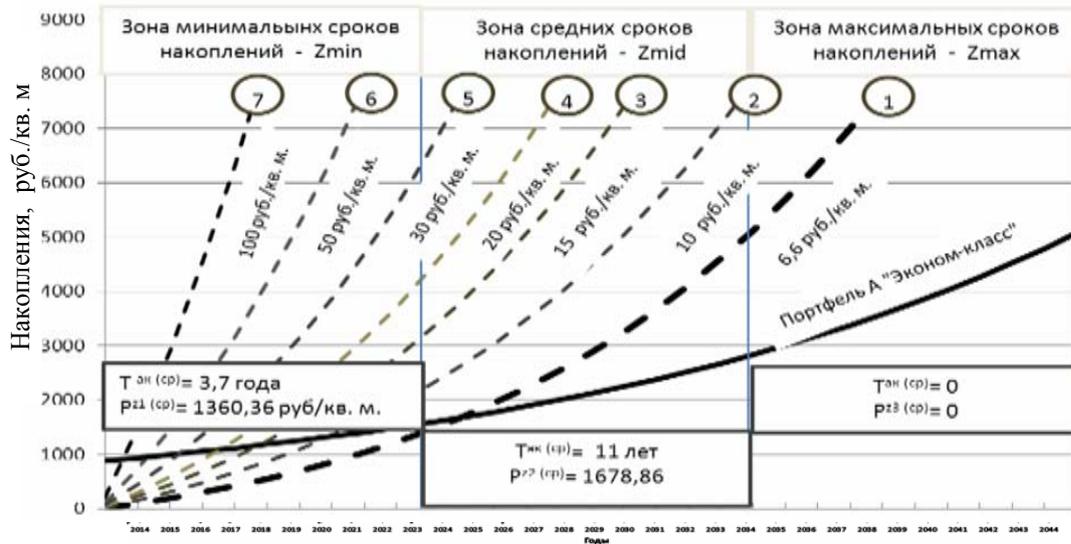


Рис. 2. Многовариантное прогнозирование сроков реализации работ по капитальному ремонту стандартизированного инвестиционного портфеля типа А «Экономкласс» в зависимости от объёмов годовых накоплений на капремонт многоквартирных домов

Выполненное моделирование позволило выделить следующие ситуационные зоны для определения прогнозных сроков накопления взносов:

- зона максимальных сроков накоплений ( $Z_{max}$ ) – от 20 до 30 лет. В ней отсутствует точка аккумуляции;

- зона средних сроков накоплений ( $Z_{mid}$ ) – от 10 до 20 лет. В данной зоне присутствует только одна точка аккумуляции для уровня платежей в 9,2 руб./кв. м. Средняя сумма аккумуляции составила 1678,86 руб./кв. м при сроке аккумуляции для данной зоны – 11 лет. Величина интегральных накоплений составила 1678,86 руб./кв. м для данной точки аккумуляции;

- зона минимальных сроков накоплений ( $Z_{min}$ ) – от 0 до 10 лет. Всего в данной зоне 6 точек аккумуляции для линий (2-7). Средняя сумма аккумуляции составила 1360,36 руб./кв. м при среднем сроке аккумуляции для данной зоны в размере 3,7 года.

Аналогичные методические расчеты были выполнены для стандартизированных инвестиционных портфелей капремонта типа В «Энергоэффективный min» и типа С «Энергоэффективный max».

Также было осуществлено многовариантное ситуационное прогнозирование расчётных сроков накоплений годовых взносов для стандартизированных инвестиционных портфелей капремонта А, В и С (рис. 3).

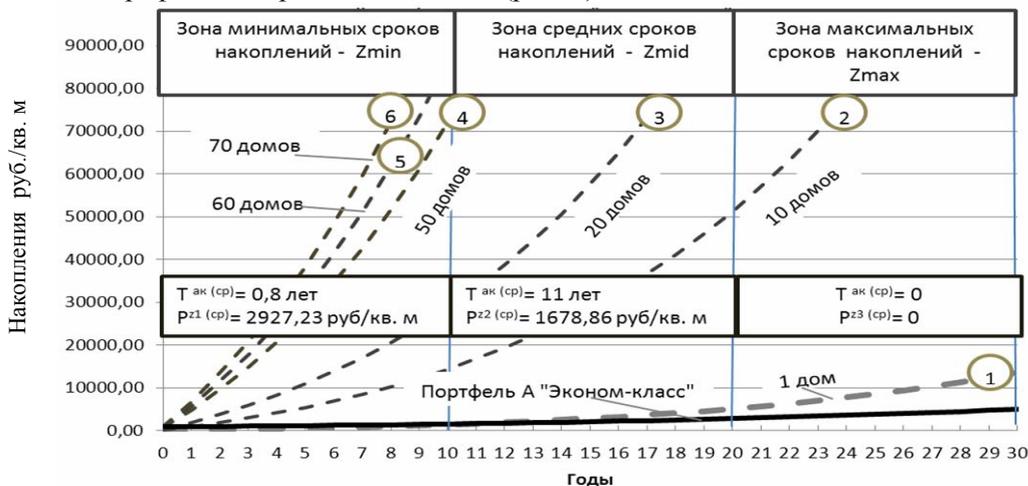


Рис. 3. Многовариантное прогнозирование сроков реализации стандартизированного инвестиционного портфеля типа А в зависимости от количества объединяемых жилых домов

Прогнозирование осуществлялось через принятую веерную систему пошагового изменения количества объединяемых жилых многоквартирных домов при условии получения одобрения этой деятельности на общем собрании домовладельцев. В качестве начальной точки веерного моделирования принят вариант без интеграции, когда накопление и использование платежей осуществляется только для одного жилого дома. Типовая веерная система принята с изменением от единичной интеграции (график 1,  $K_i=1$ ) до графика 2 с  $K_i=10$ , графика 3 с  $K_i=20$ , графика 4 с  $K_i=50$ , графика 5 с  $K_i=60$  и графика 6 с  $K_i=70$ . Полученная графическая веерная модель пересекается с различными типами инвестиционных портфелей А, В, С. Выявляемые при этом точки пересечения служат показателем достижения суммарных накоплений, достаточных для осуществления капремонта. При этом можно выделять различные ситуационные зоны сроков накоплений, достаточных для реализации различных типов инвестиционных портфелей.

Проведённый анализ полученных многовариантных прогнозных моделей позволяет выделить их следующие характерные особенности. Во-первых, необходимо обратить внимание на относительно небольшой период накоплений средств на капитальный ремонт. Стоимость наиболее затратного инвестиционного портфеля типа С «Энергоэффективный тах» благодаря интеграции удаётся реализовать через 6 лет при  $K_i=10$ , через 3 года при  $K_i=20$ , через 1 год при  $K_i=50$ ,  $K_i=60$ ,  $K_i=70$ . Во-вторых, значительный по величине коэффициент интеграции ( $K_i=50$ ,  $K_i=60$ ,  $K_i=70$ ) позволяет покрыть расходы на капитальный ремонт на ранней временной стадии и тем самым избежать рисков, вызванных макроэкономической нестабильностью.

Реализация направлений стратегии устойчивого развития позволяет получить ежегодную экономию тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период 207 Гкал/год. Результаты расчётов показывают, что эффект экономии для типового многоквартирного дома составит 1 145 006,88 руб.

#### **Обобщая результаты проведенного исследования, делаем следующие выводы:**

1. Целесообразно при моделировании устойчивости реновации жилого фонда применять инновационные оценочные подходы к определению и последующей минимизации стоимости реновации эколого-ориентированных жизненных циклов жилого фонда и стоимости владения жилой недвижимостью.

2. Увеличение требований к качеству выполняемых работ в ходе реновации жилья в части применения энергоэффективных решений, экологичности, зелени, комплексности, технологичности и инновационности всех мероприятий по воспроизводству жилой недвижимости приводит к увеличению стоимости затрат на реновацию и рост стоимости владения жильем.

3. Моделирование индекса устойчивой эксплуатации жилого фонда осуществляется через совокупность функциональных подсистем по отдельным направлениям критериальной оценки устойчивости. В наиболее общем виде смоделированы следующие подсистемы: менеджмента системы ЖКХ, энергоэффективности, зелени, экологичности, потребительской ценности и результативности существующих организационно-экономических механизмов регулирования.

#### Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королёв. – М.: МГСУ, 2012. – 412 с.

2. Байрамуков, С.Х. Концепция устойчивого строительства / С.Х. Байрамуков, З.Н. Долаева, А.У. Салпагарова // ИВД. – 2020. – №10 (70). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-ustoychivogo-stroitelstva> (дата обращения: 06.10.2022).

3. Баронин, С.А. Особенности развития проектного финансирования в жилищном строительстве и проблематика его применения вместо долевого строительства /

С.А. Баронин, Н.Ю. Есафьев // Russian Journal of Management. – 2018. – №1. – С. 32–36.

4. Baronin, S. Organizing Industrial Construction of Nuclear Power Facilities in the Global Nuclear Power Markets taking into account Reliability Simulations from Pre-Investment Stages / S. Baronin, V. Berezka // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 10–12 января 2022 года. – Virtual, Online, 2022. – P. 052050. – DOI 10.1088/1755-1315/988/5/052050. – EDN TYWFMX.

5. Данилов, А.М. Методологические принципы математического моделирования сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2016. – № 1 (1). – С. 76–79.

6. Данилов, А.М. Научная статья с позиций системного анализа / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 183–187.

7. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. Серия «Системы и проблемы управления» / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000, 528 с.

### References

1. Bazhenov, Yu.M. System analysis in building materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – М.: MGSU, 2012. – 412 p.

2. Bairamukov, S.Kh. The concept of sustainable construction / S.Kh. Bairamukov, Z.N. Dolaeva, A.U. Salpagarova // IVD. – 2020. – No. 10 (70). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-ustoychivogo-stroitelstva> (date of access: 10/06/2022).

3. Baronin, S.A. Features of the development of project financing in housing construction and the problems of its application instead of shared construction / S.A. Baronin, N.Yu. Esafiev // Russian Journal of Management. – 2018. – No. 1. – P. 32–36.

4. Baronin, S. Organizing Industrial Construction of Nuclear Power Facilities in the Global Nuclear Power Markets taking into account Reliability Simulations from Pre-Investment Stages / S. Baronin, V. Berezka // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10–12, 2022. – Virtual, Online, 2022. – P. 052050. – DOI 10.1088/1755-1315/988/5/052050. – EDN TYWFMX.

5. Danilov, A.M. Methodological principles of mathematical modeling of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Vestnik PGUAS: Construction, Science and Education. – 2016. – No. 1 (1). – P. 76–79.

6. Danilov, A.M. Scientific article from the standpoint of system analysis / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and construction. – 2014. – No. 2. – P. 183–187.

7. Prangishvili, I.V. System approach and system-wide regularities. Series «Systems and Control Problems» / I.V. Prangishvili. – М.: SINTEG, 2000. – 528 p.

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

**Резник Семен Давыдович,**  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор экономических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Менеджмент»  
E-mail: disser@bk.ru

**Черниковская Марина Витальевна,**  
кандидат экономических наук, доцент  
кафедры «Менеджмент»  
E-mail: m.chernikovskaya@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

**Reznik Semyon Davydovich,**  
Honored Scientist of the Russian Federation,  
Doctor of Economics, Professor, Head of the  
Department « Management»  
E-mail: disser@bk.ru

**Chernikova Marina Vitalievna,**  
Candidate of Economic Sciences, Associate  
Professor of the Department «Management»  
E-mail: m.chernikovskaya@mail.ru

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФИНАНСОВОЙ ГРАМОТНОСТИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ В СТРОИТЕЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ\*

С.Д. Резник, М.В. Черниковская

Представлены результаты исследования строительным университетом особенностей формирования финансовой грамотности студентов технических и экономических направлений подготовки, включающие самооценку студентами наличия качеств и компетенций, характеризующих их финансовую грамотность, изучение опыта постановки студентами жизненных целей в сфере финансов, ведения студентами учета личных денежных средств, практики управления студентами личными финансами в повседневной жизни.

*Ключевые слова: финансовая грамотность, сравнительные особенности, технические и экономические направления подготовки, студенты, университет, строительство*

## COMPARATIVE FEATURES OF THE FORMATION OF STUDENTS FINANCIAL LITERACY OF TECHNICAL AND ECONOMIC DIRECTIONS OF TRAINING AT A CIVIL ENGINEERING UNIVERSITY

S.D. Reznik, M.V. Chernikovskaya

The results of a study by a civil engineering university of the features of the formation of financial literacy of students in technical and economic areas of training, including self-assessment by students of the presence of qualities and competencies that characterize their financial literacy, studying the experience of setting life goals in the field of finance by students, keeping records of personal funds by students, and the practice of managing students' personal finances in everyday life.

*Keywords: financial literacy, comparative features, technical and economic areas of training, students, university, civil engineering*

\* Статья подготовлена в рамках выполнения грантового исследования по заказу РНФ, тема «Стратегия формирования финансовой грамотности российского студенчества как ключевое условие обеспечения их экономической самостоятельности» (№ гос. регистрации 122041500023-6)

**Введение.** В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства в течение ряда лет проводятся исследования, посвященные изучению проблем становления студенчества [1, 2]. Проведению мониторинга финансовой грамотности студентов предшествовали исследования проблем формирования социальной устойчивости и экономической самостоятельности студентов, выполненные авторами и кафедрой «Менеджмент» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства [3, 4].

В ходе этих исследований установлено, что из всех проблем формирования экономической самостоятельности российских студентов особо актуальной и недостаточно изученной является проблема формирования их финансовой грамотности. Именно этот фактор был выбран как ключевая проблема для проведения специального мониторинга студентов региональных вузов России.

Актуальность исследования формирования финансовой грамотности студентов технических и экономических направлений подготовки заключается в том, что данная сфера выполняет определенную социальную миссию по уравниванию возможностей студентов независимо от их социальной принадлежности и финансовой обеспеченности семьи. Выпускники высших учебных заведений должны быть готовы к самостоятельной жизни в условиях рыночной экономики. Необходимо, чтобы они умели сопоставлять свои потребности и возможности, грамотно использовать и развивать свой потенциал, оценивать и распределять свои материальные и трудовые ресурсы, принимать ответственность за рациональные решения и их возможные последствия.

Особая роль в повышении финансовой грамотности студентов отводится учёту специфики и направлений их подготовки. Образовательная программа экономических направлений подготовки включает преобладающее число финансовых дисциплин, что позволяет студентам получать в результате обучения более высокий уровень финансовой грамотности по сравнению со студентами технических направлений подготовки. Это определяет необходимость проведения сравнительного мониторинга финансовой грамотности студентов технических и экономических направлений подготовки, изучения опыта их подготовки.

**Обзор литературы.** Проблема повышения финансовой грамотности является особо значимой для молодого поколения, имеющего недостаточный объем финансовых знаний и подвергающегося многочисленным финансовым рискам. В этой связи вопросы повышения финансовой грамотности молодежи приобретают жизненно важное значение. В последнее время наблюдается значительное количество публикаций, посвященных этим аспектам.

Отдельные вопросы формирования и развития финансовой грамотности школьников, студентов и их родителей исследованы в работах авторов этой статьи [3, 4], Абаева А.Л., Збировой Е.П., Пратусевича В.Р. [5], Артемьевой С.С., Митрохина В.В. [6], Киселевской Е.Е. [7], Дмитриева Я.В., Алябина И.А., Бровко Е.И., Двининой С.Ю., Демьяновой О.В. [8], Подалука Е.А. [9].

Исследованию финансовой грамотности студентов вузов посвящены работы зарубежных ученых: Ramos-Hernández J.J., García-Santillán A., Molchanova V. [10], Hadzic M., Poturak M. [11], Plucker J.A., Quaglia R.J. [12], Stark J.S., Bentley R.J., Lowther M.A., Shaw K.M. [13], Clinchy B.M.V. [14].

Финансовая грамотность студентов характеризуется, на наш взгляд, как необходимый уровень знаний и навыков в области финансов, позволяющий студенческой молодежи правильно оценивать ситуацию на рынке труда, принимать обоснованные решения, минимизировать риски и тем самым повышать свою экономическую самостоятельность.

**Результаты сравнительного анализа показателей финансовой грамотности студентов технических и экономических направлений подготовки.**

Генеральной совокупностью нашего исследования явились студенты высших учебных заведений РФ. Мониторинг жизнедеятельности студентов осуществлен на основе специальной анкеты. В выборочную совокупность попали 565 студентов 29 государственных вузов Российской Федерации.

*Самооценка студентами наличия у них качеств и компетенций, характеризующих их финансовую грамотность.* Студентам предлагалось отметить наличие у них качеств и компетенций, формирующих их финансовую грамотность.

Студенты экономических направлений подготовки отметили наличие у себя таких качеств, как умение формировать личный бюджет (28,4 %), знание принципов рыночного обмена и закономерностей функционирования рыночной экономики (27,5 %), умение вести учет своих доходов и расходов (24,9 %), умение правильно оценивать рыночную ситуацию (21,8 %).

Студенты технических направлений подготовки также отметили наличие у себя знаний принципов рыночного обмена и закономерностей функционирования рыночной экономики (35,5 %), умение правильно оценивать рыночную ситуацию (30,6 %), умение вести учет своих доходов и расходов (23,0 %).

Эти совпадения связаны с тем, что современные студенты вне зависимости от направлений подготовки сейчас имеют огромные возможности получать дополнительные знания в области финансов, самостоятельно заниматься повышением своей финансовой грамотности и студенты технических направлений хорошо используют эти возможности.

В отличие от студентов экономических направлений подготовки студенты строительных и других вузов технических направлений отметили наличие у себя знаний основ микро- и макроэкономики (26,2 %). Эти компетенции частично осваиваются в период обучения в школе и включены в перечень основных дисциплин учебных планов младших курсов обучения в рамках большинства направлений подготовки в вузах.

В меньшей степени студенты экономических направлений подготовки отмечают у себя знания основ финансовой системы страны (3,4 %), умение оценивать риски от предпринимательской деятельности (5,4 %), умение оценивать целесообразность получения кредитов (6,6 %), знание основ законодательства по налогообложению и банковской деятельности (7,2 %).

В отличие от них студенты технических направлений отметили отсутствие у себя умений вести личный бюджет, в том числе с использованием современных программных продуктов (5,5 %), вкладывать свои сбережения в выгодные проекты (8,2 %), решать задачи в сфере личного экономического и финансового планирования (9,3 %), отсутствие опыта формирования финансового портфеля в семье (5,5 %).

Так же, как и студенты экономических направлений, студенты технических направлений отметили у себя недостаточный уровень знаний основ законодательства по налогообложению и банковской деятельности (6,6 %).

Это может быть связано с тем, что современные студенты в большинстве случаев посещают занятия и изучают дисциплины учебного плана, в том числе касающиеся финансовой и экономической сферы, но уровень сформированности компетенций после их изучения оказывается высоким не у всех. Это обусловлено такими проблемами, как недостаточное восприятие студентами лекционного и практического материала, отсутствие учебной мотивации студентов, наличие жизненных приоритетов, не связанных с финансами, недостаточный уровень преподавания учебных дисциплин.

*Опыт постановки студентами жизненных целей в сфере финансов.* В рамках исследования изучена практика постановки студентами жизненных целей в сфере финансов (табл. 1).

Интересным является то, что около половины (49,7 %) студентов технических направлений подготовки имеют конкретные финансовые цели на ближайшее будущее. Треть студентов (33,4 %) думают о постановке жизненных целей в редких случаях, и только 12,6 % студентов не используют постановку финансовых целей в качестве механизма повышения своей финансовой грамотности.

## Постановка студентами жизненных целей в сфере финансов

№ п/п	Варианты ответов	Всего		Группы направлений подготовки					
		чел.	%	Экономические		Технические		Гуманитарные и другие	
				чел.	%	чел.	%	чел.	%
1	Иногда думают о постановке жизненных целей	200	35,4	128	36,6	63	34,4	9	27,3
2	Имеют конкретные финансовые цели на ближайшее будущее	190	33,6	88	25,2	91	49,7	11	33,3
3	Считают постановку таких целей бесполезной тратой времени	134	23,7	100	28,7	23	12,6	11	33,3
4	Затруднились ответить	41	7,3	33	9,5	6	3,3	2	6,1
Итого		565	100,0	349	100,0	183	100,0	33	100,0

В отличие от студентов технических направлений подготовки, больше трети студентов экономических направлений (36,6 %) лишь иногда думают о постановке финансовых целей, а около трети из них (28,7 %), что в два раза выше по сравнению со студентами технических направлений, считают постановку целей бесполезной тратой времени.

Только четверть студентов (25,2 %) экономических направлений сформулировали для себя конкретные цели и пользуются этим преимуществом. Это может быть связано с отсутствием у некоторых студентов интереса к проблемам постановки жизненных целей как в целом, так и в области финансов.

Отсутствие целей в области финансов может привести к разного рода проблемам современной молодежи. Например, современные платежные системы, бесконтактные карты или мобильные платежи нередко влияют на поведение молодежи и вызывают у них опасения, в итоге молодые люди не знают, сколько тратят, так как не имеют четких финансовых целей.

*Анализ ведения студентами учета личных денежных средств.* Ведение студентами учета личных денежных средств является важным вопросом, характеризующим уровень их финансовой грамотности (табл.2).

Т а б л и ц а 2

## Ведение студентами учета своих денежных средств

№ п/п	Варианты ответов	Всего		Группы направлений подготовки					
		чел.	%	Экономические		Технические		Гуманитарные и другие	
				чел.	%	чел.	%	чел.	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Постоянно ведут учет и фиксируют все поступления и расходы	144	25,5	62	17,8	75	41,0	7	21,2
2	Ведут учет приблизительно, знают в целом, сколько у них было денег и сколько потрачено за месяц	234	41,4	161	46,1	60	32,8	13	39,4
3	Не ведут учет, не знают, сколько у них было денег и сколько потрачено за месяц	100	17,7	55	15,8	34	18,6	11	33,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	Не ведут учет, считают это нецелесообразным	48	8,5	41	11,7	7	3,8	0	0,0
5	Не ведут учет, т.к. у них нет своих личных финансовых средств	35	6,2	27	7,7	7	3,8	1	3,0
6	Затруднились ответить	4	0,7	3	0,9	0	0,0	1	3,0
Итого		565	100,0	349	100,0	183	100,0	33	100,0

Большинство студентов технических направлений подготовки (41,0 %) постоянно ведут учет денежных средств, фиксируют все поступления и расходы в отличие от студентов экономических направлений подготовки, которые только приблизительно ведут учет денежных средств, знают в целом, сколько у них было денег и сколько потрачено за месяц (46,1 %).

Вместе с тем только 26,2 % студентов технических направлений подготовки по разным причинам не практикуют ведение учета денежных средств, в отличие от студентов экономических направлений подготовки (35,2 %). В современных реалиях такие показатели учета денежных средств являются недостаточными для молодежи, так как велики риски, связанные с отсутствием информации, возникновением ситуации, когда необходимо удовлетворить текущие потребности, пренебрегая крупными, более значимыми покупками.

В рамках реализации учебного плана экономических направлений подготовки в российских вузах уделяется внимание изучению основ, приемов, принципов учета доходов и расходов, рассматривается классификация личных доходов и расходов. К тому же студенты могут дополнительно осваивать данные навыки, используя курсы, тренинги, марафоны по личностному росту и развитию, в том числе в области финансов в информационной сети. Как показало исследование, студенты технических направлений проявляют интерес к освоению навыков учета денежных средств в большей мере.

*Анализ практики управления студентами личными финансами в повседневной жизни.* Важным показателем финансовой грамотности студентов выступает практика распределения ими своих финансов в повседневной жизни (табл.3).

Т а б л и ц а 3

Распределение студентами своих финансов в повседневной жизни

№ п/п	Варианты ответов	Всего		Группы направлений подготовки					
		чел.	%	Экономические		Технические		Гуманитарные и другие	
				чел.	%	чел.	%	чел.	%
1	Стараются сначала что-то отложить (на крупные покупки, другие расходы), а остальные деньги тратят на текущие нужды	136	24,1	91	26,1	34	18,6	11	33,3
2	Тратят деньги на текущие нужды, а что остаётся – откладывают	172	30,4	96	27,5	68	37,2	8	24,3
3	Тратят все деньги на текущие нужды, а отложить ничего не удаётся	245	43,4	152	43,5	79	43,2	14	42,4
4	Затруднились ответить	12	2,1	10	2,9	2	1,0	0	0,0
Итого		565	100,0	349	100,0	183	100,0	33	100,0

Студенты технических (43,2 %) и экономических (43,5 %) направлений подготовки практически в равном соотношении поддерживают общую тенденцию – тратят все деньги на текущие нужды, в связи с чем отложить им ничего не удаётся.

Среди студентов технических направлений подготовки (37,2 %) выше по сравнению со студентами экономических (27,5 %) траты денег на текущие нужды, если что-то остается – откладывается на будущее, в отличие от этой тенденции.

Большая часть студентов экономических направлений (26,1 %) по сравнению со студентами технических направлений подготовки (18,6 %) стараются сначала что-то отложить на будущее, а оставшиеся деньги тратят на текущие нужды, что положительно характеризует их финансовую грамотность.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что проблема повышения финансовой грамотности является значимой для студентов всех направлений подготовки. Студентам технических направлений подготовки не хватает знаний в области ведения личного бюджета с использованием современных программных продуктов, умений вкладывать свои сбережения в выгодные проекты, решать задачи в сфере личного экономического и финансового планирования, опыта формирования финансового портфеля в семье.

Студентам экономических направлений требуется дополнительное приобретение знаний основ финансовой системы страны, законодательства по налогообложению и банковской деятельности, умений оценивать риски от предпринимательской деятельности, целесообразность получения кредитов.

**Заключение.** Сравнительное исследование показателей финансовой грамотности студентов технических и экономических направлений подготовки позволило сделать следующие выводы:

1. На основе самооценки наличия у студентов качеств и компетенций, характеризующих их финансовую грамотность, выявлены совпадения некоторых качеств у студентов экономических и технических направлений подготовки, среди которых: знание принципов рыночного обмена и закономерностей функционирования рыночной экономики, умение правильно оценивать рыночную ситуацию, умение вести учет своих доходов и расходов.

2. Студенты как экономических, так и технических направлений подготовки отметили у себя недостаточный уровень знаний основ законодательства по налогообложению и банковской деятельности.

3. Как показали результаты исследования, не у всех студентов, изучающих финансовые дисциплины, в итоге формируются необходимые знания, умения и навыки.

4. Анализ опыта постановки студентами жизненных целей в сфере финансов позволил отметить, что студенты технических направлений подготовки по сравнению со студентами экономических направлений имеют более конкретные финансовые цели на ближайшее будущее.

5. На основе анализа ведения студентами учета личных денежных средств отметим, что только 26,2 % студентов технических направлений подготовки по разным причинам не практикуют ведение учета денежных средств, в отличие от студентов экономических направлений подготовки, у которых эта доля больше трети (35,2 %). Видимо, студенты технических направлений проявляют интерес к освоению навыков учета денежных средств в большей мере.

6. Анализ практики управления студентами личными финансами в повседневной жизни показал, что студенты технических и экономических направлений подготовки практически в равном соотношении поддерживают общую тенденцию, тратят почти все деньги на текущие нужды, в связи с чем откладывать на будущее им практически ничего не удаётся.

7. Проблема повышения финансовой грамотности является значимой для студентов всех направлений подготовки. Как показали результаты исследования, значительная часть студентов нуждаются в приобретении дополнительных финансовых знаний, умений и навыков, не используют инструменты постановки

жизненных целей в сфере финансов, не ведут учет денежных средств, отмечают отсутствие навыков эффективного распределения бюджета.

### Список литературы

1. Резник, С.Д. Управление внеаудиторной работой студентов: опыт выпускающей кафедры строительного университета / С.Д. Резник, О.В. Холькина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2. – С. 190–191.
2. Резник, С.Д. Студенческая кафедра и ее роль в повышении профессиональных компетенций студентов строительного университета / С.Д. Резник, Я.С. Хазова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С. 215–227.
3. Резник, С.Д. Студенты России: жизненные приоритеты и социальная устойчивость: монография / С.Д. Резник, М.В. Черниковская; под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. С.Д. Резника. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 242 с.
4. Резник, С.Д. Экономическая самостоятельность студентов высших учебных заведений: социологическая оценка, проблемы и перспективы: монография / С.Д. Резник, М.В. Черниковская; под ред. д.э.н., проф. С.Д. Резника. – Пенза: ПГУАС, 2021. – 148 с.
5. Абаев, А.Л. Анализ опыта российского государственного гуманитарного университета в повышении финансовой грамотности школьников, студентов и их родителей / А.Л. Абаев, Е.П. Збировская, В.Р. Пратусевич // Вестник РГГУ. Серия «Экономика. Управление. Право». – 2017. – №3 (9). – С. 115–118.
6. Артемьева, С.С. Оценка финансовой грамотности Российской и зарубежной молодежи и рекомендации по ее повышению / С.С. Артемьева, В.В. Митрохин // Интеллектуальные транспортные системы. – 2018. – №1 (90). – С. 46–59.
7. Киселевская, Е.Е. Анализ финансовой грамотности студентов вузов / Е.Е. Киселевская // Молодой ученый. – 2016. – №10. – С. 733–736.
8. Дмитриев, Я.В. Развитие цифровых навыков у студентов вузов: ДЕ-ЮРЕ VS ДЕ-ФАКТО / И.А. Алябин, Е.И. Бровко, С.Ю. Двинина, О.В. Демьянова // Университетское управление: практика и анализ. – 2021. – № 25(2). – С. 59–79.
9. Подкалюк, Е.А. Сравнительный анализ уровня финансовой грамотности студентов экономического факультета / Е.А. Подкалюк, А.Е. Тараскина // Актуальные проблемы и перспективы развития инновационной экономики и управления : сборник научных статей (Калининград, 25–28 апреля 2019 года). – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2019. – С. 301–306.
10. Ramos-Hernández, J.J., Financial literacy level on college students: a comparative descriptive analysis between Mexico and Colombia / J.J. Ramos-Hernández, A. García-Santillán, V. Molchanova // European Journal of Contemporary Education. – 2020. – Vol. 9, № 1. – P. 126–144.
11. Hadzic, M. Students perception about financial literacy: case study of international Burch university / M.Hadzic, M. Poturak // European Researcher. – 2014. – № 6–2 (77). – P. 1155–1166.
12. Plucker, J.A. The student aspirations survey: assessing student effort and goals / J.A. Plucker, R.J. Quaglia // Educational and Psychological Measurement. – 1998. – Vol. 58, № 2. – P. 252–257.
13. Stark, J.S. The student goals exploration: reliability and concurrent validity / J.S. Stark, R.J. Bentley, M.A. Lowther, K.M. Shaw // Educational and Psychological Measurement. – 1991. – Vol. 51, № 2. – P. 413–422.
14. Clinchy, B.M.V. Goals 2000: the student as object / B.M.V. Clinchy // Phi Delta Kappan. – 1995. – Vol. 76, № 5. – P. 383–388.

1. Reznik, S.D. Management of extracurricular work of students: the experience of the graduating department of the civil engineering university / S.D. Reznik, O.V. Kholkina // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – No. 2. – P. 190–191
2. Reznik, S.D. Student department and its role in improving the professional competencies of students of the civil engineering university / S.D. Reznik, Ya.S. Khazova // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – No. 4. – P. 215–227
3. Reznik, S.D. Students of Russia: life priorities and social sustainability: monograph / S.D. Reznik, M.V. Chernikovskaya; under total ed. Dr. Econ. sciences, prof. S.D. Reznik. – M.: INFRA-M, 2019. – 242 p.
4. Reznik, S.D. Economic independence of students of higher educational institutions: sociological assessment, problems and prospects: monograph / S.D. Reznik, M.V. Chernikovskaya, ed. Doctor of Economics, prof. S.D. Reznik. – Penza: PGUAS, 2021 – 148 p.
5. Abaev, A.L. Analysis of the experience of the Russian State University for the Humanities in improving the financial literacy of schoolchildren, students and their parents / A.L. Abaev, E.P. Zbirovskaya, V.R. Pratusевич // *Bulletin of the Russian State Humanitarian University. Series “Economics. Control. Right»*. – 2017. – No. 3 (9). – P. 115–118.
6. Artemyeva, S.S. Assessment of financial literacy of Russian and foreign youth and recommendations for its improvement / S.S. Artemyeva, V.V. Mitrokhin // *Intelligent transport systems*. – 2018. – No. 1 (90). – P. 46–59.
7. Kiselevskaya, E. E. Analysis of financial literacy of university students / E. E. Kiselevskaya // *Young scientist*. – 2016. – No. 10. – P. 733–736.
8. Dmitriev, Ya.V. Development of digital skills among university students: DE JURE VS DE FACTO / I.A. Alyabin, E.I. Brovko, S.Yu. Dvinina, O.V. Demyanova // *University management: practice and analysis*. – 2021. – No. 25(2). – P. 59–79.
9. Podkalyuk, E. A. Comparative analysis of the level of financial literacy of students of the Faculty of Economics / E. A. Podkalyuk, A. E. Taraskina // *Actual problems and prospects for the development of innovative economics and management: collection of scientific articles (Kaliningrad, April 25–28 2019)*. – Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University. – 2019. – P. 301–306.
10. Ramos-Hernández, J.J., Financial literacy level on college students: a comparative descriptive analysis between Mexico and Colombia / J.J. Ramos-Hernández, A. García-Santillán, V. Molchanova // *European Journal of Contemporary Education*. – 2020. – Vol. 9, No. 1. – P. 126–144.
11. Hadzic, M. Students perception about financial literacy: case study of international Burch university / M.Hadzic, M. Poturak // *European Researcher*. – 2014. – No. 6–2 (77). – P. 1155–1166.
12. Plucker, J.A. The student aspirations survey: assessing student effort and goals / J.A. Plucker, R.J. Quaglia // *Educational and Psychological Measurement*. – 1998. – Vol. 58, No. 2. – P. 252–257.
13. Stark, J.S. The student goals exploration: reliability and concurrent validity / J.S. Stark, R.J. Bentley, M.A. Lowther, K.M. Shaw // *Educational and Psychological Measurement*. – 1991. – Vol. 51, No. 2. – P. 413–422.
14. Clinchy, B.M.V. Goals 2000: the student as object / B.M.V. Clinchy // *Phi Delta Kappan*. – 1995. – Vol. 76, No. 5. – P. 383–388.

# Указатель статей, опубликованных в 2022 году

## Index of articles, published in 2022

1. **Акимова М.С., Карабанова Н.Ю., Антропов Д.В.** Технология установления границ населенных пунктов для планировки территории. – №3(52). – С. 218–226.
2. **Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К.** Анализ развития возможностей глонасс для выполнения геодезических работ в строительстве на современном этапе развития спутниковых технологий. – №3(52). – С. 199–212.
3. **Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К.** Инновационный метод выполнения геодезических работ в строительстве на принципах навигационной системы ГЛОНАСС. – №4(53). – С.111–119.
4. **Андреев С.Ю., Князев В.А.** Теоретический анализ свойств водовоздушной смеси, содержащей пузырьки, всплывающие в турбулентном режиме и режиме автомодельности закона сопротивления. – №2(51). – С. 134–141.
5. **Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.** Математическое моделирование процесса работы напорного технологического трубопровода в режиме гидравлически гладкого трения. – №3(52). – С. 188–198.
6. **Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.** Новая методика расчета гидродинамических характеристик пристеночного слоя ламинарного и турбулентного потоков жидкости в напорных технологических трубопроводах. – №3(52). – С. 177–187.
7. **Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.** Новая технология деструктивной очистки производственных сточных вод. – №4(53). – С.98–104.
8. **Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.** Сравнительный анализ методик определения осредненных местных скоростей потока жидкости в гидравлически гладких и вполне шероховатых технологических трубопроводах. – №4(53). – С.120–131.
9. **Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Андреев В.С.** Теоретический анализ и рекомендации по расчету процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле микроциклона. – №1(50). – С.102–109.
10. **Андреев С.Ю., Степанов С.В., Князев В.А., Шиляев А.М.** Интенсификация напорной флотационной очистки сточных вод за счет вторичного введения во флотационный объем крупнодисперсной водовоздушной смеси. – №1(50). – С.93–101.
11. **Андреев С.Ю., Шеин А.И., Курносков Н.Е., Алексеев Д.П.** Экспериментальные исследования процесса работы вихревого гидравлического аэратора. – №2(51). – С. 142–152.
12. **Арискин М.В., Ванин И.В.** Соединение деревянных конструкций на стальных шайбах с внутренней резьбой. – №4(53). – С.84–89.
13. **Арискин М.В., Логанина В.И., Светалкина М.А.** Влияние пористости цементных бетонов на монолитность лакокрасочных покрытий. – №2(51). – С. 45–52.
14. **Арискин М.В., Мартышкин Д.О.** Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях. – №2(51). – С. 96–103.

- 
15. **Баканова С.В., Белов В.Е.** Тепловлажностный и воздушный балансы в животноводческих помещениях. – №1(50). – С.116–119.
  16. **Бакушев С.В.** Изгиб тонких жёстких пластин с касательными усилиями. – №1(50). – С.63–74.
  17. **Бакушев С.В.** Расчёт тонкого нелинейно-упругого стержня. – №3(52). – С. 117–125.
  18. **Береговой А.М.** Влияние воздухопроницаемости ограждающих конструкций на микроклимат и тепловые потери помещений. – №2(51). – С. 192–195.
  19. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Подходы к разработке архитектурно-строительного решения энергоэффективного здания. – №3(52). – С. 213–217.
  20. **Береговой В.А., Лавров И.Ю.** Высокофункциональные бетоны в станкостроении: технологические аспекты применения. – №4(53). – С.18–25.
  21. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Имитационные модели эргатических систем в строительстве: формирование навыков управления. – №3(52). – С. 144–152.
  22. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Общая схема идентификации и синтеза строительных материалов. – №4(53). – С.26–30.
  23. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Опыт применения методов системного анализа в строительном материаловедении. – №3(52). – С. 58–62.
  24. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Рациональная идентификация сложных систем. – №1(50). – С.23–27.
  25. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Синтез материалов с регулируемыми свойствами. – №2(51). – С. 39–44.
  26. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Системное проектирование композитов: моделирование, синтез, управление. – №1(50). – С.37–43.
  27. **Варенцов В.К., Кошев А.Н., Кузина В.В.** Определение основных параметров электрохимических процессов в проточных трехмерных электродах при регенерации электролитов железнения. – №3(52). – С. 161–165.
  28. **Вилкова Н.Г., Мишина С.И.** Ультразвук в изменении краевого угла смачивания органомодифицированных частиц. – №4(53). – С.105–110.
  29. **Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Мазурин Н.Н.** Модификация поверхности твердых частиц для получения устойчивых пен. – №2(51). – С. 124–133.
  30. **Волоцкой А.Н., Авдонин В.В.** Оценка динамики прочностных характеристик вибропоглощающих полимерных материалов на основе этиленвинилацетата с течением времени. – №2(51). – С. 68–74.
  31. **Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т.** Реологические свойства эпоксидных композитов, модифицированных жидким каучуком. – №3(52). – С. 53–57.
  32. **Гайдук А.Р., Сабитов Л.С., Мирхасанов Р.Ф., Бочарова Ю.В.** Образное решение архитектурно-инженерной композиции: башня и свет. – №4(53). – С.150–160.
  33. **Гарькин И.Н., Гарькина И.А., Клюев С.В., Саденко Д.С.** Из опыта экспертизы конструкций зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера. – №4(53). – С.66–74.
  34. **Гордина А.Ф., Гуменюк А.Н., Полянских И.С., Гафипов А.Т.** Исследование влияния комплексных добавок на свойства фторангидридных материалов. – №3(52). – С. 69–79.
  35. **Гречишкин А.В., Антонов А.И., Путинцева А.А.** Прямой звук от транспортной магистрали на территории малоэтажной застройки. – №2(51). – С. 167–174.
  36. **Гришин Б.М., Бикунова М.В., Титов Е.А., Шеин А.И.** Удаление органических форм железа из подземных вод с применением перекиси водорода. – №2(51). – С. 161–166.
  37. **Гришина А.Н.** Оценка эффективности модифицирования цементных материалов синтетическими нано- и микроразмерными частицами гидросиликатов цинка. – №3(52). – С. 5–15.
  38. **Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Викторова О.Л.** Архитектурно-строительное проектирование: проблемы оценки качества. – №2(51). – С. 196–201.

39. **Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Чупряков М.А.** Сравнительный анализ технико-экономических показателей проектных решений жилых и общественных зданий. – №1(50). – С.134–139.
40. **Домке Э.Р., Жесткова С.А., Караванова М.А.** Принципы повышения уровня безопасности дорожного движения на федеральных дорогах. – №1(50). – С.110–115.
41. **Домке Э.Р., Жесткова С.А., Нелюбин Е.А.** Роль Прогнозирования автодорожной аварийности в решении строительных задач региона. – №3(52). – С. 171–176.
42. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Мишин А.А., Мочалов А.В.** Теоретические и экспериментальные исследования по определению массовой концентрации сажи и копоти в воздухе залов богослужения. – №1(50). – С.81–87.
43. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А.** Методика и программа экспериментальных исследований температурных и скоростных полей в зоне всасывающего отверстия вытяжного зонта. – №4(53). – С.132–139.
44. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А., Мишин А.А., Мочалов А.В.** Комплексное решение локализации загрязнений в процессе сгорания церковных свечей в православных сооружениях. – №2(51). – С. 104–116.
45. **Еремкин А.И., Леонтьев В.А., Пономарева И.К.** Функционирование общеобменных систем вентиляции и разработка инженерных методов по наладке воздушного баланса здания на примере МТРК «КОЛЛАЖ». – №3(52). – С. 134–143.
46. **Еремкин А.И., Фильчакина И.Н., Пономарева И.К., Орлова Н.А.** Пластинчатый воздухораспределитель системы вытесняющей вентиляции для помещений культурно-зрелищных залов. – №2(51). – С. 117–123.
47. **Ерофеев В.Т., Максимова И.Н., Санягина Я.А., Ерофеева И.В.** Подбор составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности по реологическим свойствам. – №3(52). – С. 16–31.
48. **Ерофеев В.Т., Максимова И.Н., Санягина Я.А., Ерофеева И.В.** Прочность и морозостойкость декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности. – №3(52). – С. 32–45.
49. **Клюев С.В., Гарькин И.Н., Клюев А.В.** Сравнительный анализ неразрезных подкрановых балок. – №3(52). – С. 101–116.
50. **Комаров В.А., Болдырева О.В., Трегуб А.Ю.** Короткие консоли ригелей многоэтажных каркасов: прочность бетона при совместном действии сжатия и среза. – №1(50). – С.58–62.
51. **Королев Е.В., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Методологические принципы синтеза композиционных материалов как систем: состояние и перспективы. – №4(53). – С.51–58.
52. **Королев Е.В., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Практические аспекты идентификации и управления при синтезе композитов. – №2(51). – С. 24–32.
53. **Королева Т.И., Столяров Д.В., Шапошник Д.С.** Аналитическая оценка основных теплофизических свойств диффузионного ламинарного пламени. – №4(53). – С.140–149.
54. **Кошев А.Н., Варенцов В.К., Кузина В.В.** Математическое моделирование процесса электрохимического восстановления ионов железа в проточном трехмерном электроде при регенерации окисленных электролитов. – №3(52). – С. 153–160.
55. **Крылова М.К.** Архитектурные решения агропромышленных кластеров и пути их развития в России. – №1(50). – С.120–133.
56. **Кузина В.В., Кошев А.Н., Еремкин А.И.** Математическое моделирование распределения конвективного потока над компактно расположенными точечными тепловыми источниками. – №1(50). – С.75–80.
57. **Лапшина Е.Г.** Концепция архитектурного пространства городов: динамическая составляющая. – №4(53). – С.170–175.
58. **Леонтьев В.А.** Совершенствование балансового метода расчета потребленной тепловой энергии. – №3(52). – С. 166–170.

- 
59. **Логанина В.И., Зайцева М.В.** Известковые составы для реставрации штукатурки. – №3(52). – С. 80–95.
60. **Логанина В.И., Зайцева М.В.** Обеспечение качества составов для отделки стен зданий. – №3(52). – С. 63–68.
61. **Логанина В.И., Зайцева М.В.** Обоснование выбора наполнителя при разработке рецептуры известкового состава для реставрации зданий. – №2(51). – С. 33–38.
62. **Логанина В.И., Зайцева М.В.** Структурообразование известкового камня в присутствии полисиликатного раствора. – №1(50). – С.4–8.
63. **Логанина В.И., Карпова О.В.** Применение статистических методов управления качеством отделки строительных изделий и конструкций. – №4(53). – С.5–11.
64. **Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В.** Влияние шероховатости поверхности цементной подложки на напряженное состояние лакокрасочных покрытий. – №4(53). – С.12–17.
65. **Макаревич Е.А., Селютина Л.Ф.** Объект истории архитектуры и культурного наследия: часовня николая чудотворца в мелойгубе (республика карелия). – №2(51). – С. 175–183.
66. **Макарова Л.В., Логанина В.И., Кармишина А.С.** Методика оценки результативности управленческих решений на предприятиях строительной индустрии. – №1(50). – С.9–17.
67. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Прогнозирование и оптимизация трещиностойкости модифицированных бетонов во времени. – №2(51). – С. 17–23.
68. **Макимова И.Н., Королев Е.В., Макридин Н.И.** Влияние интенсивности тепловлажностной обработки на конструкционную прочность ранней стадии структурообразования и твердения бетонов. – №3(52). – С. 46–52.
69. **Мартышкин Д.О., Арискин М.В.** Расстановка клеенных стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций. – №4(53). – С.75–83.
70. **Наумов В.А.** Определение оптимального диаметра трубопровода локальной системы водоснабжения с учетом нагрузочных характеристик и затрат на центробежный насос. – №2(51). – С. 153–160.
71. **Низина Т.А., Балыков А.С., Коровкин Д.И., Володин С.В., Володин В.В.** Влияние комплексных модификаторов на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и минеральных добавок различного состава на технологические и физико-механические свойства цементных систем. – №1(50). – С.28–36.
72. **Очкина Н.А.** Тепловыделение высокоглиноземистого цемента в процессе гидратации. – №3(52). – С. 96–100.
73. **Раузеев И.З., Сабитов Л.С., Бочарова Ю.В.** Современные тенденции в архитектурной реновации промышленных предприятий и производственных комплексов. – №4(53). – С.161–169.
74. **Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Аниканова Т.В., Хахалева Е.Н.** К вопросу об аномальном схватывании и твердении портландцемента. – №2(51). – С. 53–61.
75. **Резник С.Д., Черниковская М.В.** Сравнительные особенности формирования финансовой грамотности студентов технических и экономических направлений подготовки в строительном университете. – №4(53). – С.187–194.
76. **Родин А.И., Ермаков А.А., Ерофеев В.Т.** Структура и свойства пористой стеклокерамики из шихты на основе кремнистых пород, модифицированной бокситами. – №2(51). – С. 5–16.
77. **Розен А.Е., Перелыгин Ю.П., Киреев С.Ю., Гришин Б.М.** Многослойный материал для защиты водопроводных металлических труб от коррозии. – №1(50). – С.88–92.
78. **Рыжов А.С., Титунин А.А.** Влияние состава древесно-минерального композита на его прочностные показатели. – №2(51). – С. 62–67.
79. **Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Арискин М.В.** Основы научно-технического сопровождения объектов капитального строительства. – №2(51). – С. 89–95.

- 
80. **Селяев В.П., Селяев П.В., Лазарев А.Л., Грязнов С.Ю., Аверкина М.Ю.** Фрактальная квантово-механическая модель деформирования и разрушения бетона. – №4(53). – С.31–40.
81. **Смирнова Ю.О., Грабовый К.П.** Стратегии устойчивой реновации в сфере строительства: механизмы энергосбережения. – №4(53). – С.181–186.
82. **Снежкина О.В., Толушов С.А.** Железобетонные балки в зоне действия поперечных сил. – №3(52). – С. 125–133.
83. **Снежкина О.В., Шейн А.И., Стешин К.М.** Прочность наклонного сечения изгибаемого железобетонного элемента. – №4(53). – С.59–65.
84. **Тараканов О.В., Суздальцев О.А., Белякова Е.А.** Снижение расхода цемента в бетонах нового поколения. – №1(50). – С.18–22.
85. **Тарасеева Н.И., Крылов А.С., Кузнецов Д.А.** Физико-химические процессы и основы разрушения транспортных сооружений на автомобильных дорогах. – №2(51). – С. 82–88.
86. **Черкасов В.Д., Щербак Ю.П., Юркин Ю.В., Авдониин В.В., Черкасов Д.В.** Самоклеящиеся радиопоглощающие покрытия. – №4(53). – С.41–50.
87. **Чертес К.Л., Пыстин В.Н., Тупицына О.В., Гришин Б.М.** Обработка и утилизация смеси осадков сточных вод и твёрдых коммунальных отходов: перспективные технологические решения. – №4(53). – С.90–97.
88. **Чикота С.И.** Лепной декор фасадов зданий советского периода города Магнитогорска. – №2(51). – С. 184–191.
89. **Шабанов Е.С., Титунин А.А.** Совершенствование процесса изготовления опалубок для реставрационных работ с применением аддитивных технологий. – №4(53). – С.176–180.
90. **Шейн А.И., Азимова Я.А.** Практическая оптимизация фиброармированных балок. – №1(50). – С.51–57.
91. **Шейн А.И., Зернов В.В., Зайцев М.Б.** Восстановление работоспособности несущих кирпичных стен: страховочные стойки. – №2(51). – С. 75–81.
92. **Шейн А.И., Чуманов А.В.** Определение рационального направления лент (тросов) крепления ленточно-тросового гасителя колебаний сооружений. – №1(50). – С.44–50.