

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Адрес издателя, редакции и типографии:
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)

Редактор М.А. Сухова

Корректор Н.В. Кучина

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 02.06.2025.

Формат 60х84 1/8.

Уч.-изд.л. 25,75. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 81.

Дата выхода в свет 09.06.2025.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 2500 руб.

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 2(63)/2025

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

**Идрисов И.Х., Болдырев Г.Г.,
Макридин Н.И., Максимова И.Н.**
ИСПЫТАНИЯ ГЛИНОШЛАКОВЫХ
КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО
И КОМПРЕССИОННОГО СЖАТИЯ 5

Черкасов В.Д., Бородин А.В.
НЕОТВЕРЖДАЕМЫЙ ГЕРМЕТИК
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА ОТКРЫТОМ
ВОЗДУХЕ 24

Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г., Ерофеева И.В.
ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ
ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ПРИСУТСТВИИ ХИМИЧЕСКИХ
МОДИФИКАТОРОВ 31

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОМПОЗИТОВ КАК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ:
ОТ БЕРНШТЕЙНА С.Н. ДО МОИСЕЕВА Н.Н. 40

Алфимова Н.И., Пириева С.Ю.
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ
ТВЕРДЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ
ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ 46

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ
К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ КАК СИСТЕМ 55

Береговой В.А., Лавров И.Ю., Капустин А.Е.
МИКРОСТРУКТУРА И ДЕМПФИРУЮЩИЕ
ПОКАЗАТЕЛИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА .. 60

Глазков Р.А., Кожухова Н.И.
ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ
ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО
НА ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ..... 68

Вилкова Н.Г., Мишина С.И.
КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ
КАК КРИТЕРИЙ ГИДРОФОБИЗАЦИИ
ПОВЕРХНОСТИ ГИПСА 77

© Авторы публикаций, 2025

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2025

© ПГУАС, 2025

Логанина В.И., Езерский В.А. ШТУКАТУРНЫЕ РАСТВОРЫ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ИЗВЕСТИ 85	Шени А.И., Быков А.Н. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ «СООРУЖЕНИЕ – ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВЯЗИ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ 150
Варенцов В.К., Кузина В.В., Кошев А.Н. РЕАКЦИОННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАК ОДНА ИЗ ВАЖНЕЙШИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ И НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЗАЦИИ УГЛЕГРАФИТОВЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ 92	ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 159
Москвин Р.Н., Белякова Е.А. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ КАУСТИФИКАЦИИ АКТИВИЗАТОРОВ В КОМПОЗИТЕ И ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ МИНЕРАЛЬНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ 99	Медведева О.Н., Сауткина Т.Н. СРАВНЕНИЕ ОМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ 159
Соколова С.В., Сидоренко Ю.В. ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 105	Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Алексеев Д.П., Лебединский К.В. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СТОЛКНОВЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА В ДИНАМИЧЕСКИХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ «ВОДА – ВОЗДУХ» 167
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 114	АРХИТЕКТУРА 174
Селяев В.П., Бабушкина Д.Р., Архипов И.В., Бусаргин Д.А. МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ 114	Радионов Т.В., Сабитов Л.С., Харьковская Н.Н., Бенаи Х.А., Фазылзянова Г.И. НОВЕЙШАЯ АРХИТЕКТУРА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ КОМПЛЕКСОВ 174
Ивашенко Ю.А., Шабиев С.Г. КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ 122	Разумов А.В. ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНОЙ РЕОРГАНИЗАЦИИ СТАДИОНОВ «ЛУЖНИКИ» (МОСКВА) И «МАРАКАНА» (РИО-ДЕ-ЖАНЕЙРО) 183
Замалиев Ф.С., Замалиев Э.Ф. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕРЕВОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ 128	Гарькин И.Н., Галишникова В.В. МЕТОДИКА ДЕТЕРМИНАЦИИ СТЕПЕНИ ДЕСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: СИСТЕМНО-СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ 193
Мартышкин Д.О., Залилов И.В., Арискин М.В. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ БОЛТОВ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ 143	Береговой А.М. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ОДНО- И МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ .. 200

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Varentsov V.K., Kuzina V.V., Koshev A.N. REACTION SURFACE AS ONE OF THE MOST IMPORTANT CHARACTERISTICS OF COMPOSITES AND NANOCOMPOSITES BASED ON METALLIZATION OF CARBON-GRAPHITE FIBER MATERIALS	92
Idrisov I.Kh., Boldyrev G.G., Makridin N.I., Maksimova I.N. TESTING OF CLAYSLAG COMPOSITES UNDER AXIAL AND COMPRESSION COMPRESSION CONDITIONS	5	Moskvin R.N., Belyakova E.A. FEATURES OF CAUSTICATION PROCESSES OF ACTIVATORS IN COMPOSITE AND STRENGTH FORMATION OF MINERAL SLAG BINDERS.....	99
Cherkasov V.D., Borodin A.V. NON-CURING SEALANT FOR OUTDOOR USE	24	Sokolova S.V., Sidorenko Yu.V. OPTIMIZATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SPECIAL PURPOSE CONCRETES	105
Tarakanov O.V., Ivashchenko Y.G., Erofeeva I.V. FORMATION OF CEMENT MATERIALS MICROSTRUCTURE IN THE PRESENCE OF CHEMICAL MODIFIERS	31	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	114
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF STUDYING COMPOSITES AS COMPLEX SYSTEMS: FROM BERNSTEIN S.N. TO MOISEEV N.N.....	40	Selyaev V.P., Babushkina D.R., Arhipov I. V., Busargin D.A. MECHANICS OF DESTRUCTION OF BUILDING MATERIALS WITH AN HETEROGENEOUS STRUCTURE UNDER THE ACTION OF A COMPRESSIVE LOAD.....	114
Alfimova N.I., Pirieva S.Yu. THE EFFECT OF HARDENING CONDITIONS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF GYPSUM-CONTAINING WASTE.....	46	Ivashenko Yu.A., Shabiev S.G. STRUCTURES AND MATERIALS FOR ECOLOGICAL CONSTRUCTION OF RESIDENTIAL BUILDINGS.....	122
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. MODERN APPROACHES TO DESIGNING COMPOSITIONAL MATERIALS	55	Zamaliyev F.S., Zamaliyev E.F. NUMERICAL INVESTIGATIONS OF WOOD-CONCRETE OVERLAP	128
Beregovoy V.A., Lavrov I.Yu., Kapustin A.E. MICROSTRUCTURE AND DAMPING PARAMETERS OF FINE-GRAINED CONCRETE.....	60	Martyshkin D.O., Zalilov I.V., Ariskin M.V. BEARING CAPACITY OF FIBERGLASS BOLTS CONNECTING WOODEN STRUCTURES.....	143
Glazkov R.A., Kozhukhova N.I. THE EFFECT OF THE METHOD OF SLAG-ALKALINE BINDER PRODUCTION ON ITS PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS	68	Shein A.I., Bykov A.N. EQUATIONS OF MOTION «STRUCTURE – CROSS-LINKING DAMPING CONNECTIONS» FOR SEISMIC DISTURBANCES.....	150
Vilkova N.G., Mishina S.I. CONTACT ANGLE AS A CRITERION OF GYPSUM SURFACE HYDROPHOBIZATION.....	77	ENGINEERING SYSTEMS.....	159
Loganina V.I., Ezerskiy V.A. PLASTERING MORTARS BASED ON HYDRAULIC LIME	85	Medvedeva O.N., Sautknia T.N. COMPARISON OF THE MAGNETIZING ABILITY OF DEVICES FOR MAGNETIC WATER TREATMENT	159
		Andreev S.Yu., Safronov M.A., Alekseev D.P., Lebedinsky K.V. THEORETICAL ANALYSIS OF AIR BUBBLES COLLISION PROCESS IN DYNAMIC DISPERSED WATER-AIR SYSTEMS	167

ARCHITECTURE.....	174	Garkin I.N., Galishnikova V.V.	
Radionov T.V., Sabitov L.S.,		METHOD OF DETERMINING	
Kharkovskaya N.N., Benai Kh.A.,		THE DEGREE OF DESTRUCTION	
Fazylzyanova G.I.		OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS:	
THE LATEST ARCHITECTURE OF		SYSTEM-STRUCTURAL	
RESEARCH COMPLEXES	174	ANALYSIS	193
Razumov A.V.		Beregovoy A.M.	
THE SPECIFICS OF ARCHITECTURAL		HEAT AND MASS TRANSFER IN SINGLE–	
REORGANIZATION OF STADIUMS		AND MULTI-LAYERED ENCLOSING	
«LUZHNKI» (MOSCOW) AND		STRUCTURES UNDER EXTREME	
«MARACANA» (RIO DE JANEIRO).....	183	CLIMATIC CONDITIONS	200

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.4:692.115

DOI 10.54734/20722958_2025_2_5

ООО НПП «Геотек»

Россия, 440004, г. Пенза,
ул. Центральная, стр. 1М,
тел.: (8800) 200-16-05

Идрисов Илья Хамитович,
кандидат технических наук,
генеральный директор

Болдырев Геннадий Григорьевич,
доктор технических наук, директор
по научной работе и инновациям

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

Макридин Николай Иванович,
доктор технических наук, главный научный
сотрудник научно-исследовательского сектора

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

NPP Geotek LLC

Russia, 440004, Penza,
building 1M, Tsentralnaya St.,
tel.: (8800) 200-16-05

Idrisov Ilya Khamitovich,
Candidate of Sciences, General Director

Boldyrev Gennady Grigorievich,
Doctor of Sciences, Director of Research and
Innovation

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Makridin Nikolai Ivanovich,
Doctor of Sciences, Researcher of the
Research Sector

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Science, Associate Professor of
the Department «Management of Quality»
E-mail: maksimovain@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ ГЛИНОШЛАКОВЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО И КОМПРЕССИОННОГО СЖАТИЯ

И.Х. Идрисов, Г.Г. Болдырев, Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Выполнены испытания смеси глины со шлаком при добавке активизатора NaOH и при различном соотношении введенного шлака. Определены физические свойства грунта в природном состоянии; параметры прочности и деформируемости глины в естественном состоянии, а также требуемое количество вяжущего в зависимости от трех критериев: содержания вяжущего, коэффициента отношения воды к вяжущему и массы вяжущего на единицу объема закрепляемого грунта. Исследовано влияние количества добавляемого вяжущего на деформационные и прочностные свойства шлакогрунта, которые определялись методами одноосного сжатия и компрессионного сжатия. Проведены испытания глиношлаковой смеси (содержание молотого шлака 10, 20, 30 % от массы глины) без предварительного уплотнения. Изучен процесс уплотнения природной глины и глиношлаковой смеси с ростом нормального давления (при 20 %-м содержании молотого шлака на седьмые сутки твердения).

Ключевые слова: глиношлаковый композит; одноосное сжатие; компрессионное сжатие; боковое обжатие; модуль упругости, модуль деформации

TESTING OF CLAYSLAG COMPOSITES UNDER AXIAL AND COMPRESSION COMPRESSION CONDITIONS

I.Kh. Idrisov, G.G. Boldyrev, N.I. Makridin, I.N. Maksimova

The clay-slag mixture has been tested with the addition of NaOH activator and with a different ratio of the introduced slag. The physical properties of the soil in its natural state and the parameters of strength and deformability of clay in its natural state are determined. The required amount of the binder is determined depending on three criteria: the binder content, the ratio of water to binder, and the binder mass per unit volume of the soil to be fixed. The effect of the amount of binder added on the deformation and strength properties of the slag soil, which have been determined by the methods of axial compression and compression compression, is investigated. The clay-slag mixture tested (the content of ground slag is 10, 20, 30 % of the mass of clay) without pre-sealing. The process of compaction of natural clay and clay-slag mixture with an increase in normal pressure (at 20 % ground slag content on the seventh day of hardening) has been investigated.

Keywords: clay-slag composite; uniaxial compression; compression compression; lateral compression; modulus of elasticity, modulus of deformation

Целью настоящей работы является развитие системы контроля и оценки качества строительных глинистых композитов, укрепленных шлакощелочным вяжущим, с разработкой измерительно-вычислительного комплекса и методов испытаний при различных видах напряженного состояния.

В рамках поставленной научной проблемы были выполнены испытания смеси глины со шлаком при добавке активизатора NaOH и при различном соотношении введенного шлака. В качестве вяжущего использовался гранулированный шлак Липецкого металлургического комбината, который соответствует требованиям ГОСТ 3476–2019 [1]. Шлак применялся в виде молотого порошка с удельной поверхностью $S = 300 - 350 \text{ м}^2/\text{кг}$. В табл. 1 представлен химический состав шлака. Испытания проводились с образцами, содержащими 10, 20 и 30 % молотого шлака от массы глинистого грунта с добавкой NaOH в количестве 2 % от массы.

Т а б л и ц а 1

Химический состав шлака

Наименование шлака	Содержание оксидов, %									M ₀	M _a	K
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	MnO	FeO	P ₂ O ₅			
Новолипецкий	38,1	9,52	–	40,5	9,37	0,65	–	0,5	–	1,05	0,25	1,6

Опыты проводились для исследования влияния количества добавляемого вяжущего на деформационные и прочностные свойства шлакогрунта, которые определялись методами одноосного сжатия и компрессионного сжатия.

Испытания естественного глинистого грунта и шлакогрунтовой смеси были выполнены с использованием измерительно-вычислительного комплекса ИВК «АСИС», в конфигурацию которого были включены приборы: одноосного сжатия, одноосного сжатия при невозможности боковых расширений (компрессионное сжатие) (рис. 1). Использование нескольких приборов позволило не только сократить сроки испытаний образцов материалов, так как они проводились одновременно, но и выполнить комплекс испытаний при различном виде напряженного состояния и траекториях напряжений.

Методика подготовки образцов зависит от способа смешивания грунта с вяжущим. В связи с тем что глинистые грунты, характерные для отложений г. Пензы и Пензенской области, имеют естественную влажность не более 30 %, сухой способ смешивания невозможно применить без дополнительного увлажнения смешиваемого с вяжущим грунта. Поэтому в наших исследованиях использовалась технология мокрого метода.

Подобное предварительное уплотнение материала на строительной площадке при закреплении естественных грунтов выполнить невозможно по технологическим причинам. Во-первых, как при сухом, так и при мокром методе смешивание грунтов с

вяжущим происходит непосредственно в массиве закрепляемого грунта, в пределах столба, создаваемого смесительным механизмом. Во-вторых, закрепление грунтов производится на глубину от трёх до 20 м без уплотнения, так как сама технология предусматривает только смешивание грунта в скважине с сухим или «мокрым» вяжущим.

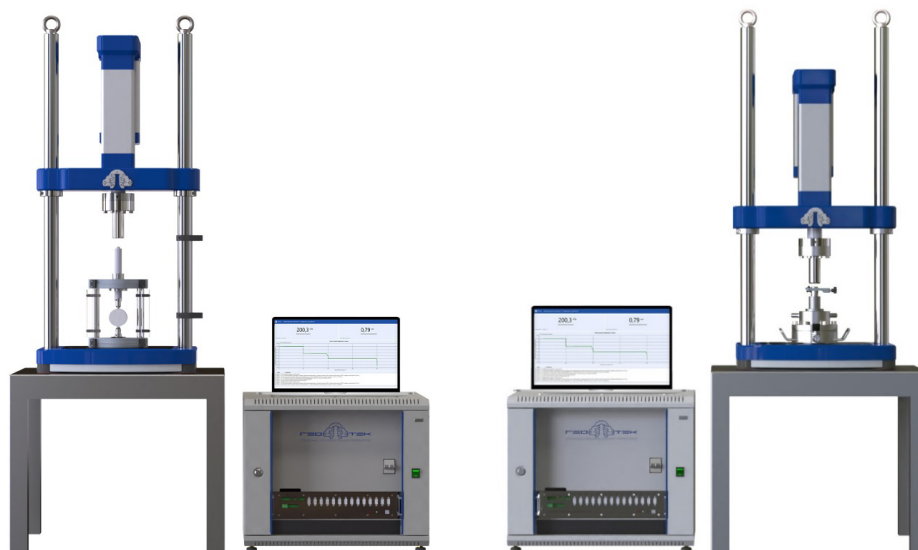


Рис. 1. Приборы одноосного и компрессионного сжатия

Однако и в наших опытах мы уплотняли образцы грунтовой смеси, учитывая, что грунтошлаковая смесь в скважинах будет уплотняться под действием собственного веса. Например, при глубине упрочнения массива грунта 20 м и удельном весе грунта 18,3 кПа вертикальное давление на этой глубине составит $20 \times 18,3 = 366$ кПа. Естественно, это значительно ниже давления 30 МПа, применяемого при изготовлении штучных строительных материалов.

Небольшие значения давления прессования и мокрый способ приготовления грунтовой смеси непосредственно на строительной площадке являются особенностями наших исследований, которые определены применяемой технологией упрочнения грунтовых оснований.

В соответствии с изложенным была принята следующая методика подготовки образцов грунтовой смеси. Молотый шлак смешивался с водой и активизатором, а затем – с грунтом; смесь укладывалась в формы под давлением или без него.

После поступления монолитов грунта в лабораторию они помещаются в герметичные ящики и хранятся при комнатной температуре.

Перед изготовлением образцов упрочненного шлаком грунта были определены физические свойства грунта в природном состоянии по ГОСТ 5180–2015 [2] (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Физические характеристики материалов

Материал	Влажность, w , %	Плотность ρ , г/см ³	Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	Число пластичности I_p	Влажность на границе текучести w_L , %	Влажность на границе раскатывания w_p , %	Показатель текучести I_L	Степень водонасыщения S_r	Коэффициент пористости e	Коэффициент фильтрации k
Глиношлаковый композит	0,42	1,69	1,19	2,70	–	–	–	–	0,894	1,56	–
Глина	0,30	1,91	1,47	2,70	0,20	0,41	0,21	0,45	0,967	0,838	–

Затем с помощью устройства для вырезания образцов из монолита грунта получали образцы диаметром 91 мм и высотой 25 мм для испытаний на сжимаемость в условиях одномерной деформации с целью определения характеристик сжимаемости.

При подготовке образцов шлакогрунта к испытаниям определяли требуемое количество вяжущего. В общем случае при оценке эффективности применяемых вяжущих используются три критерия: содержание вяжущего, коэффициент отношения воды к вяжущему (водоцементное отношение) и масса вяжущего на единицу объема закрепляемого грунта:

A_w (%) – отношение веса вяжущего к весу грунта в сухом состоянии;

W / C – отношение веса воды к весу вяжущего;

C_w (кг/м³) – масса вяжущего на единицу объема грунта.

В соответствии с определением первого критерия

$$A_w = \frac{m_a}{m_k} \times 100, \quad (1)$$

где m_a – масса вяжущего (г); m_k – масса сухого грунта (г).

Полагая, что в процессе перемешивания объем V остается неизменным, то уравнение (1) можно переписать в виде:

$$A_w = \frac{m_a / V}{m_k / V}. \quad (2)$$

Поэтому уравнение (2) позволяет определить требуемое количество вяжущего в зависимости от содержания воды W_o , содержания вяжущего A_w и объема массы влажного грунта m_t :

$$m_a = \frac{(m_t \times A_w)}{(1 + W_o)}. \quad (3)$$

Требуемое количество вяжущего на единицу объема грунта C_w (г/см³) может быть получено из выражения (2) в виде:

$$m_a / V \text{ (г/см}^3\text{)} = A_w \times (m_k / V), \quad (4)$$

$$m_a / V \text{ (г/см}^3\text{)} = A_w \times \frac{m_t}{(1 + W_o) \times V}, \quad (5)$$

$$C_w = A_w \times \frac{\rho_t}{(1 + W_o)}, \quad (6)$$

где ρ_t – плотность грунта (г/см³); m_t – масса влажного грунта, $m_t = m_k (1 + W_o)$; W_o – начальная влажность грунта.

Поэтому, если содержание воды W_o , содержание вяжущего A_w , плотность ρ_t известны, то из уравнения (4) получаем следующую зависимость:

$$C_w \text{ (кг/м}^3\text{)} = A_w \times \frac{\rho_t}{(1 + W_o)} \times 1000. \quad (7)$$

С другой стороны, если требуемое количество вяжущего задается в виде веса на единицу объема грунта C_w (кг/м³), то содержание вяжущего A_w (%) может быть вычислено из следующего выражения:

$$A_w \text{ (%) } = C_w \times \frac{(1 + W_o)}{\rho_t} \times \frac{1}{1000}. \quad (8)$$

Уравнения (6) – (8) показывают зависимость между C_w и A_w . Нижеприведенные уравнения (9), (10) – взаимосвязь между C_w и A_w и отношением W/C . По определению:

$$W/C = \frac{m_w}{m_a} = \frac{(m_t - m_k)}{m_a}, \quad (9)$$

$$W/C = \frac{(m_t - m_k)/m_k}{m_a/m_k} = \frac{W_o(\%)}{A_w(\%)}, \quad (10)$$

где m_k – масса сухого грунта; m_w – масса воды, $m_w = (m_t - m_k)$; m_t – масса влажного грунта.

Уравнение (10) показывает, что W/C -отношение является также отношением начальной влажности грунта W_o к содержанию вяжущего A_w .

Уравнение (10) может быть также записано в следующем виде:

$$W/C = \frac{\rho_t \times (W_o / (1 + W_o))}{m_a / V}, \quad (11)$$

где $(m_t - m_k)/V = m_t \times (W_o / (1 + W_o)) / V = \rho_t \times (W_o / (1 + W_o))$.

Отношение воды к вяжущему можно выразить через начальное содержание воды W_o , плотность ρ_t и C_w следующим образом:

$$W/C = \frac{W_o}{(1 + W_o)} \times \frac{\rho_t}{C_w (\text{кг/м}^3)} \times 1000. \quad (12)$$

Уравнение (12) позволяет определить соответствующее количество вяжущего в полевых условиях, когда известна начальная влажность грунта W_o , отношение воды к вяжущему W/C , плотность ρ_t (г/см^3):

$$C_w (\text{кг/м}^3) = \frac{W_o}{(1 + W_o)} \times \frac{\rho_t}{W/C} \times 1000. \quad (13)$$

В табл. 3 приведены значения критериев стабилизации грунта при его начальной влажности W_o и плотности ρ_t (г/см^3).

Т а б л и ц а 3

Характеристики грунта

Вид грунта	Начальное содержание воды W_o	Плотность ρ_t (г/см^3)	C_w (кг/м^3)	A_w (%)	W/C
Глина	0,75	1,57	50	2,7	26,9
			100	11,1	6,7
			150	16,6	4,5

При изготовлении образцов глинистого композита была принята следующая процедура.

1. В специальном миксере выполнялось смешивание шлака с глиной и активизатором. Содержание компонент по массе принималось равным: шлак – 10 %, 20 %, активизатор NaOH – 2 %.

2. Перемешанная масса помещалась в формы диаметром 91 мм и высотой 25 мм.

3. Для первой серии опытов были подготовлены цилиндрические образцы, у которых твердение смеси осуществлялось без прессования, при атмосферном давлении и окружающей влажности и температуре.

Испытания выполнялись по методикам ГОСТ 12248.2–2020 [3], ГОСТ 12248.4–2020 [4], ГОСТ 24452–2023 [5].

Цель испытаний заключалась в исследовании влияния содержания шлака (10, 20 %) при постоянном содержании активизатора (2 %) на прочность глиношлаковой смеси.

Опыты выполнялись в две серии. В первой серии были проведены испытания на одноосное сжатие при твердении глиношлаковой смеси при атмосферном давлении, а во второй серии опытов – при твердении при различном нормальном давлении (200, 400 и 600 кПа).

Опыты проводились с постоянной скоростью нагружения, равной 1,0 мм/мин. Влияние скорости нагружения на прочностные и деформационные свойства в данной работе не рассматривалось. В процессе нагружения регистрировались: осевое напряжение σ_1 , радиальная деформация $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ при задаваемой осевой деформации ε_1 .

Образцы глины естественной ненарушенной структуры были подготовлены из монолитов, которые были отобраны в черте города Пензы (район Терновка, территория, прилегающая к аэропорту) с глубины 3–4 м с использованием бурового станка ПБУ-2. С помощью устройства для вырезания образцов грунта и набора режущих колец были подготовлены образцы грунта ненарушенной структуры для последующих испытаний в условиях: одноосного сжатия; компрессионного сжатия.

На рис. 2, 3 и в табл. 4 приведены результаты испытаний образцов глины ненарушенной структуры.

Среднее (из четырех) значение прочности на одноосное сжатие глины с естественной структурой равно 0,184 МПа. Недренированная прочность C_U , определяемая как $C_U = R / 2$, равна 0,92 МПа. Коэффициент Пуассона, полученный из зависимости, приведенной на рис. 4, $\nu = \Delta\varepsilon_3 / \Delta\varepsilon_1 = 0,123$. Модуль упругости, найденный на начальном участке зависимости «деформация – напряжение» (см. рис. 2) и на основе выражения $E = \Delta\sigma_1 / \Delta\varepsilon_1$, равен 8,59 МПа.

Т а б л и ц а 4

Параметры прочности и деформируемости глины в естественном состоянии

Наименование параметров	Значение
Прочность на одноосное сжатие R , МПа	0,184
Недренированная прочность C_U , МПа	0,92
Модуль упругости E , МПа	8,59
Коэффициент Пуассона ν	0,123

Далее были проведены испытания глиношлаковой смеси без предварительного уплотнения. Все опыты имели трех-семикратную повторяемость. В приведенных ниже таблицах и на графиках представлены средние значения из ряда последовательных испытаний.

В процессе нагружения образцов материала фиксировалась их форма деформации в виде фотоснимков, которые приведены ниже на отдельных рисунках.

Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси с 10 %-м содержанием шлака приведены на рис. 4–8.

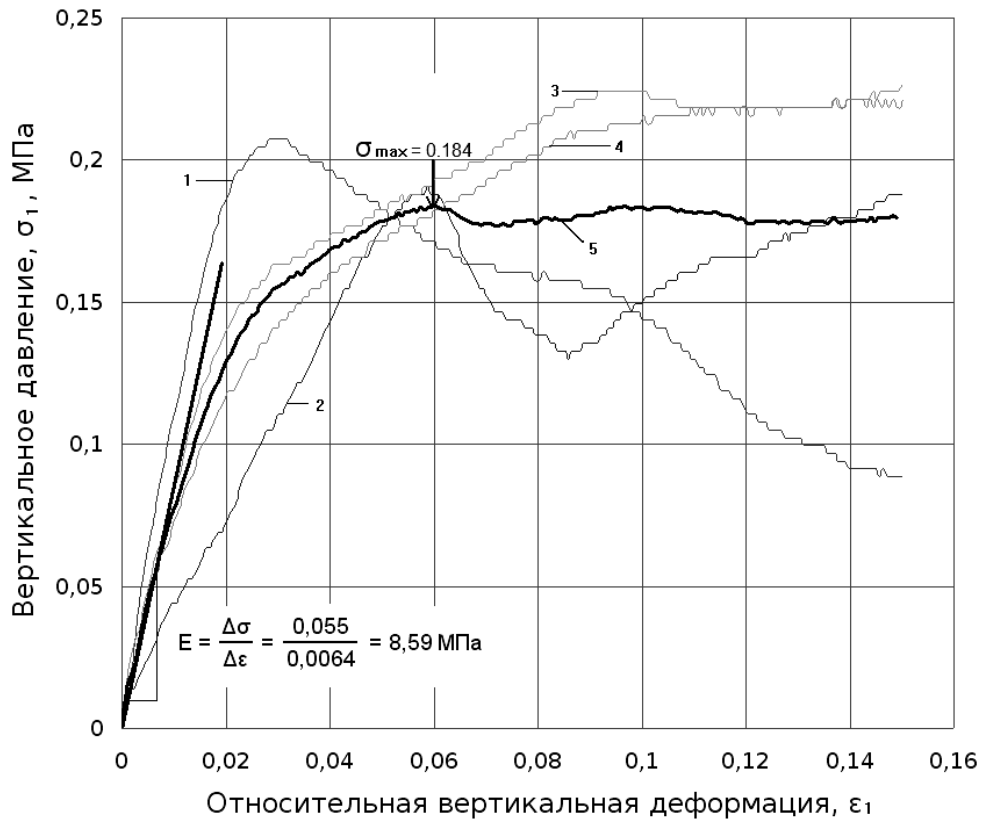


Рис. 2. Результаты испытаний образцов глины с естественной структурой в условиях одноосного сжатия:
1, 2, 3, 4 – данные четырех испытаний; 5 – среднее значение

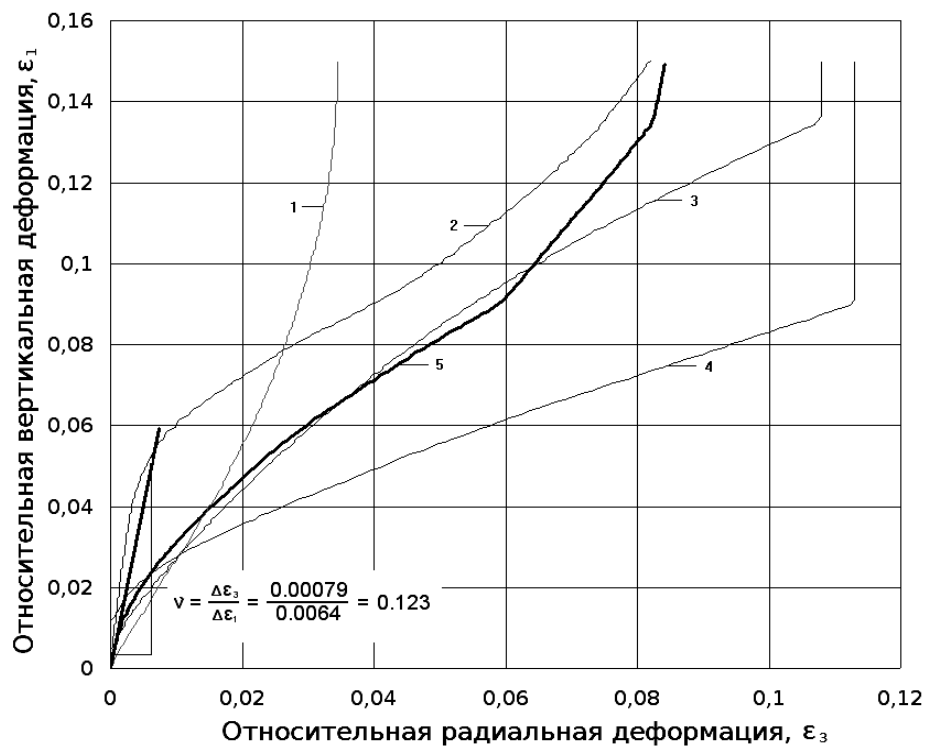


Рис. 3. Зависимость радиальной деформации от осевой деформации:
1, 2, 3, 4 – данные опытов; 5 – среднее значение

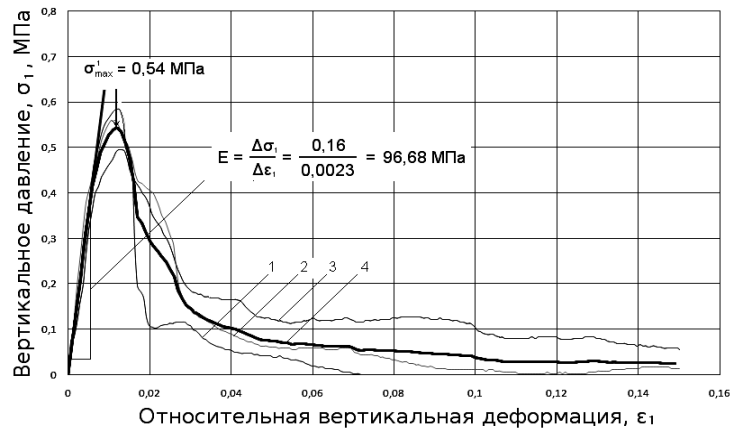


Рис. 4. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 10 %-м содержании шлака, семь суток твердения:
1, 2, 3 – результаты опытов; 4 – среднее значение

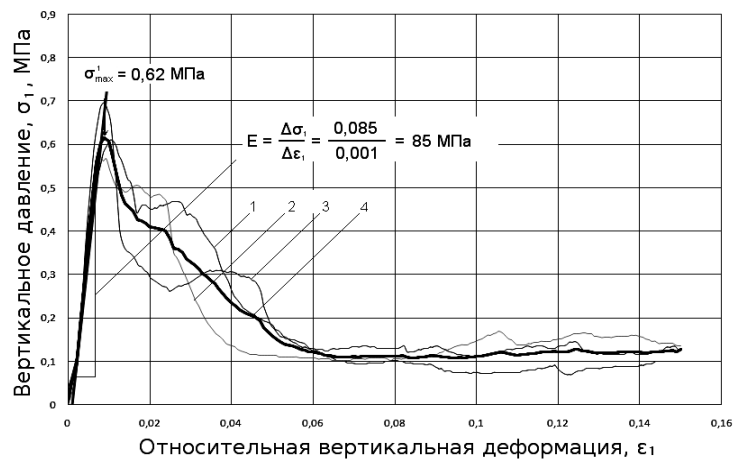


Рис. 5. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 10 %-м содержании шлака, 14 суток твердения:
1, 2, 3 – результаты опытов; 4 – среднее значение

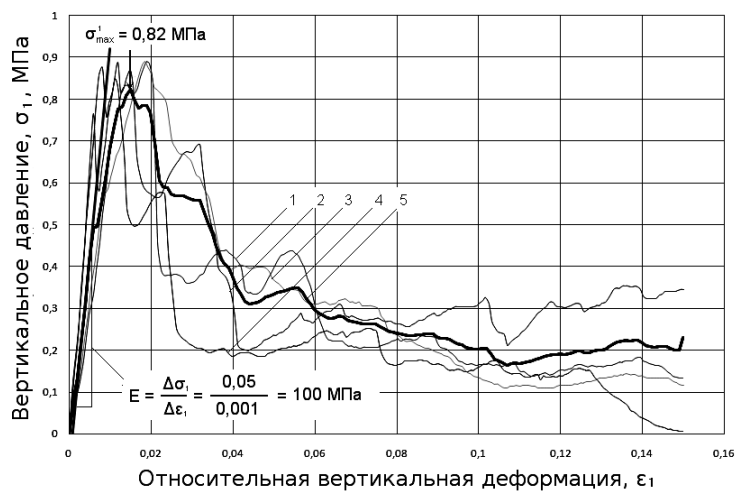


Рис. 6. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 10 %-м содержании шлака, 28 суток твердения:
1, 2, 3, 4 – результаты опытов; 5 – среднее значение

На рис. 7 можно видеть форму деформации образцов грунта по мере роста осевой нагрузки. Отчетливо показаны два наблюдаемых явления. Первое – расширение диаметра образцов под нагрузочным штампом. Второе – образование трещин в материале после определенной степени нагружения, как правило, при нагрузке выше предела пропорциональности. Трещины развиваются прогрессивно с ростом внешней нагрузки. При нагрузке, соответствующей пределу прочности (максимум на рис. 4, 5, 6), начинается разделение образца на отдельные блоки, что сопровождается падением прочности с ростом осевой деформации. В некоторых опытах видна клиновидная область материала под нагрузочным штампом (фото на рис. 7-4, 8-4) после полного разрушения образца. Эта область, по всей видимости, возникает в зоне упрочнения материала, а затем расклинивает образец, вызывая образование и развитие видимых трещин.



Рис. 7. Форма деформации образца глиношлаковой смеси на различных ступенях осевого нагружения при 10 %-м содержании шлака, 14 суток твердения

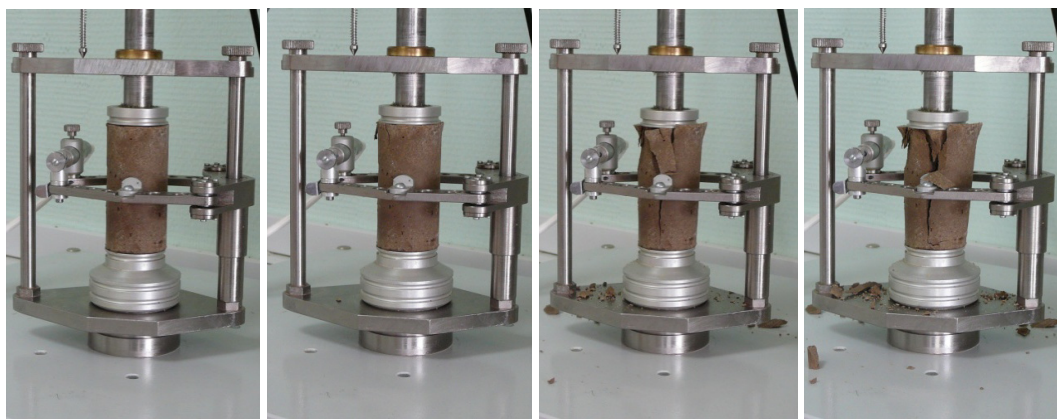


Рис. 8. Форма деформации образца глиношлаковой смеси на различных ступенях осевого нагружения при 10 %-м содержании шлака, 28 суток твердения

Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси с 20 %-м содержанием шлака приведены на рис. 9–12.

Результаты экспериментальных исследований указывают на рост предела пропорциональности (области упругого поведения материала) с увеличением количества вяжущего, то есть явно просматривается возрастающая линейность зависимости «деформация – напряжение». Наблюдения за динамикой возникновения видимых трещин также показывают, что их образование зависит от количества вяжущего. Если при 10 %-м содержании вяжущего видимые трещины возникают в верхней части образца, а затем развиваются по направлению вниз (см. фото на рис. 8), то при 20 %-м содержании вяжущего трещины образуются в нижней части образца (см. фото на рис. 12) и распространяются вверх. После полного разрушения образца на основании видна клиновидная область материала.

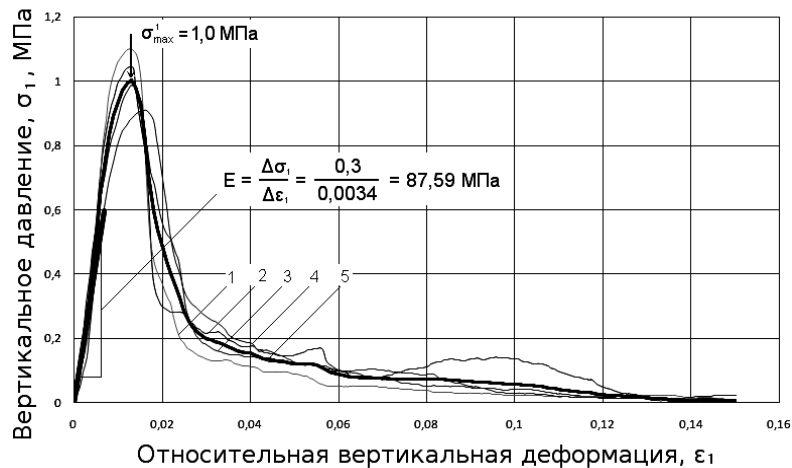


Рис. 9. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 20 %-м содержании шлака, семь суток твердения:
1, 2, 3, 4 – результаты опытов; 5 – среднее значение

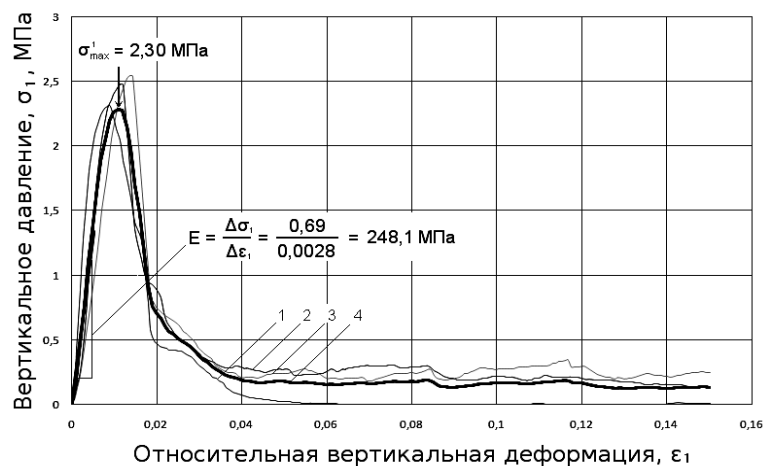


Рис. 10. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 20 %-м содержании шлака, 14 суток твердения:
1, 2, 3 – результаты опытов; 4 – среднее значение

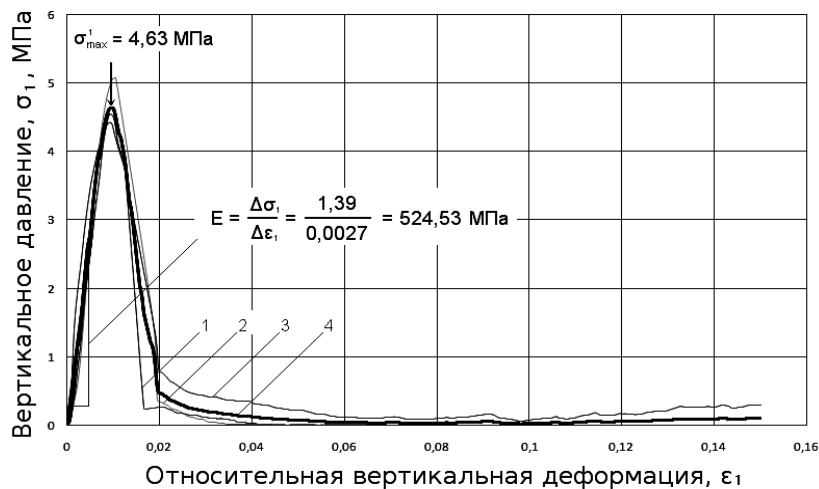


Рис. 11. Результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 20 %-м содержании шлака, 28 суток твердения:
1, 2, 3 – результаты опытов; 4 – среднее значение



Рис. 12. Форма деформации образца глиношлаковой смеси на различных ступенях осевого нагружения при 20 %-м содержании шлака, 28 суток твердения

В табл. 5 и 6 приведены результаты испытаний образцов глиношлаковой смеси при 10 %-м и 20 %-м содержании шлака в возрасте 7, 14, 28 суток.

Т а б л и ц а 5

Параметры прочности и деформируемости глиношлаковой смеси
при 10 %-м содержании шлака

Наименование параметров	Время твердения, сутки		
	7	14	28
Прочность на одноосное сжатие R , МПа	0,54	0,62	0,82
Недренированная прочность C_U , МПа	0,27	0,31	0,41
Модуль упругости E , МПа	96,7	85,0	100,0

Т а б л и ц а 6

Параметры прочности и деформируемости глиношлаковой смеси
при 20 %-м содержании шлака

Наименование параметров	Время твердения, сут		
	7	14	28
Прочность на одноосное сжатие R , МПа	1,0	2,30	4,63
Недренированная прочность C_U , МПа	0,50	1,15	2,31
Модуль упругости E , МПа	87,6	248,1	524,5

В табл. 7 приведены значения прочности при одноосном сжатии, полученные как среднеарифметические значения из семи испытаний. Испытания проводились без предварительного уплотнения после завершения процесса твердения при атмосферном давлении.

Т а б л и ц а 7

Прочность образцов глиношлаковой смеси на одноосное сжатие
при различном содержании шлака

Состав смеси	Прочность, МПа		
	7 сут	14 сут	28 сут
Глина в природном состоянии	0,184	0,184	0,184
Глина + 10 % шлака	0,54	0,62	0,82
Глина + 20 % шлака	1,0	2,30	4,63

Из результатов испытаний, приведенных в табл. 7, можно сделать вывод о зависимости прочности от содержания шлака в глиношлаковой смеси и от времени. Кинетика набора прочности в сильной степени зависит от времени, что свиде-

тествует о явно выраженной линейной зависимости. Модуль упругости также линейно возрастает со временем твердения.

Из сравнения экспериментальных данных, представленных в табл. 5 и 6, видно, как увеличивается прочность и уменьшается деформируемость глиношлаковой смеси с ростом содержания шлака. В естественном состоянии глина имеет модуль упругости, равный 8,59 МПа, и прочность, равную 0,184 МПа. При 20 %-м содержании шлака на 28-е сутки твердения модуль упругости увеличивается до 524,5 МПа, а прочность на сжатие – до 4,63 МПа. Таким образом, сжимаемость уменьшается почти в 60 раз, а прочность возрастает в 25 раз.

В серии опытов с предварительным уплотнением образцов были выполнены испытания на одноосное сжатие образцов глиношлаковой смеси при 20 %-м содержании шлака и трех значениях давления предварительного уплотнения: 200, 400 и 600 кПа.

Результаты опытов показаны на рис. 13, 14, 15.

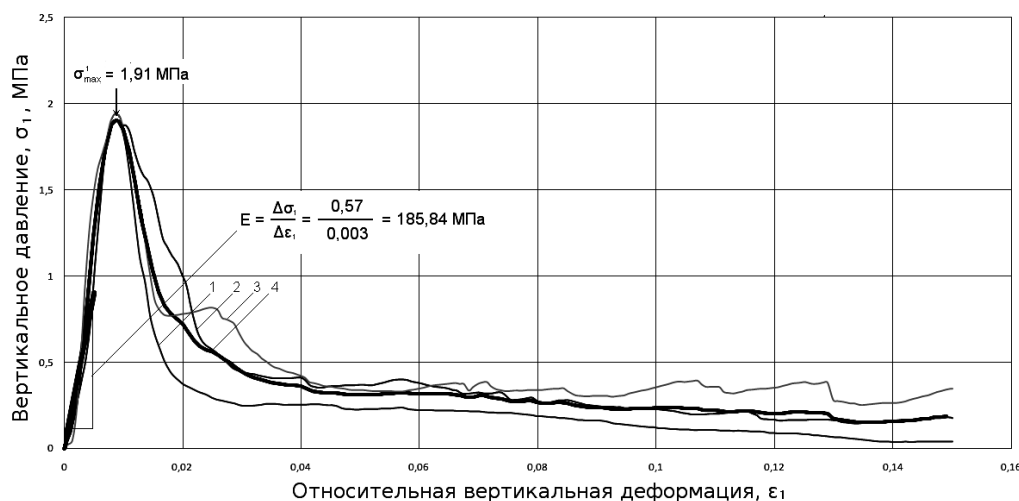


Рис. 13. Результаты испытаний глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 20 %-м содержании шлака, семь суток твердения, $\sigma = 200$ кПа:

1, 2, 3 – результаты опытов; 4 – среднее значение

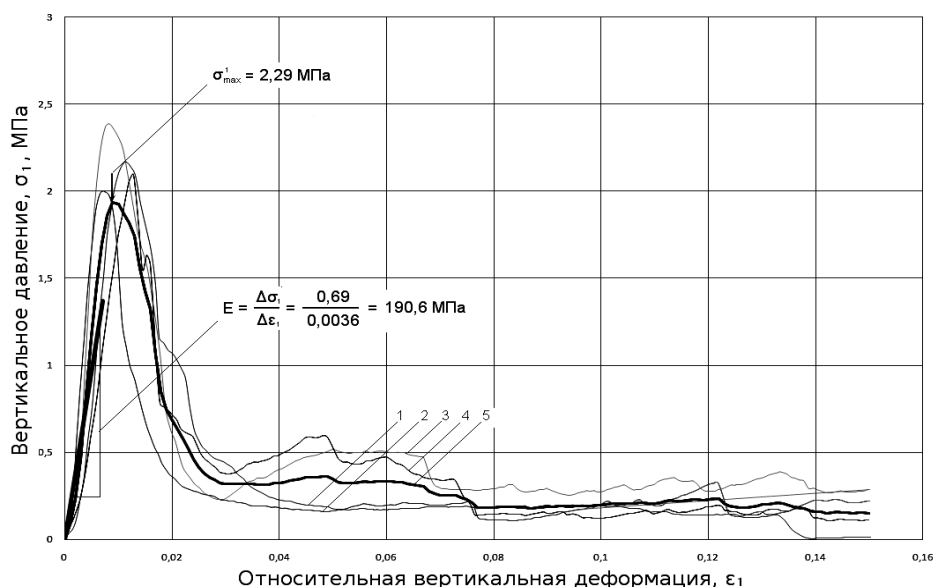


Рис. 14. Результаты испытаний глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 20 %-м содержании шлака, семь суток твердения, $\sigma = 400$ кПа:

1, 2, 3, 4 – результаты опытов; 5 – среднее значение

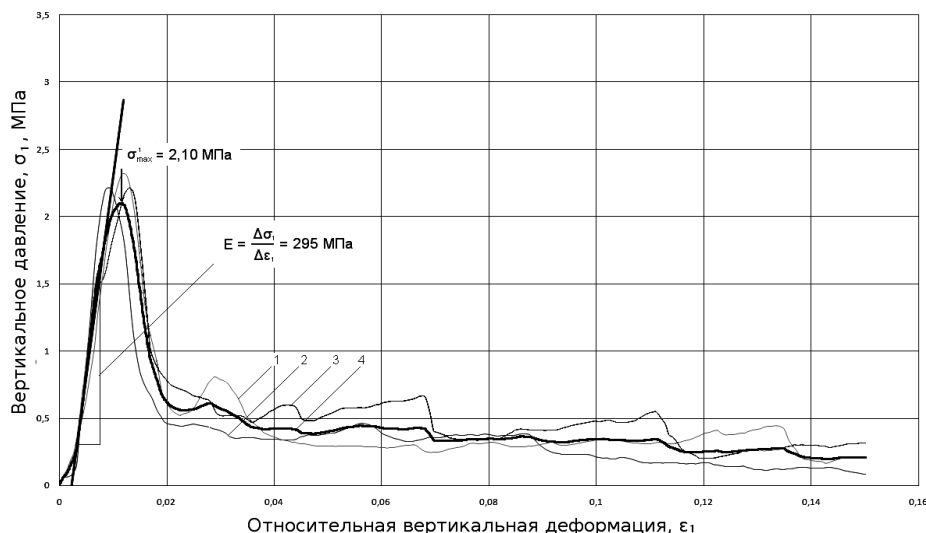


Рис. 15. Результаты испытаний глиношлаковой смеси в условиях одноосного сжатия при 20 %-м содержании шлака, семь суток твердения, $\sigma = 600$ кПа:
1, 2, 3 – результаты опытов; 4 – среднее значение

В табл. 8 приведены результаты испытаний на одноосное сжатие образцов глиношлаковой смеси с выдержкой в процессе твердения материала под давлением предварительного уплотнения.

Т а б л и ц а 8

Прочность образцов глиношлаковой смеси на одноосное сжатие при 20 %-м содержании шлака и различном давлении предварительного уплотнения на седьмые сутки твердения (среднее из трех опытов)

Состав смеси	Прочность, МПа		
	200 кПа	400 кПа	600 кПа
Глина в природном состоянии	0,17	–	0,17
Глина + 20 % шлака	1,92	2,26	2,86

Если сравнить значения прочности образцов глиношлаковой смеси при 20 %-м содержании шлака на седьмые сутки твердения (см. табл. 8), то видно, что прочность глиношлаковой смеси возрастает до определенного предела с ростом давления предварительного уплотнения. Прочность в естественном состоянии глины равна 0,184 МПа, без уплотнения глиношлаковой смеси она составляет 1,0 МПа, а с уплотнением при давлении в 200 кПа равна 1,92 МПа. Видно, что процедура предварительного уплотнения в процессе твердения глиношлаковой смеси приводит к повышению прочности почти в два раза. Однако в дальнейшем рост давления предварительного уплотнения не приводит к ожидаемому увеличению прочности. Из данных таблицы 8 видно, что набор прочности прекращается при давлении в 400 кПа, и дальше он не зависит от величины нормального давления. Наблюдаемое явление находится в противоречии с подобными испытаниями для цементно-грунтовых смесей, где отмечается рост прочности по мере увеличения давления предварительного уплотнения [6].

Цель испытаний в условиях компрессионного сжатия – исследование закономерности сжимаемости (уплотнения) материалов и определение модуля деформации. Методика испытаний приведена в ГОСТ 12248.4–2020 [4]. Цель испытаний заключается в исследовании процесса уплотнения материала с ростом нормального давления. Этот процесс характеризуется уменьшением объема пор в материале с ростом нормального давления. По результатам испытаний строят зависимость изменения коэффициента пористости от нормального давления. Далее, используя эту

зависимость, находят модуль деформации, характеризующий жесткость исследуемого материала в выбранном диапазоне нормального давления. Этот модуль не совпадает с модулем упругости, найденным из условий одноосного сжатия, так как он находится при невозможности бокового расширения материала. Однако этот модуль широко используется при расчете оснований зданий и сооружений и должен быть определен и для закрепленного шлаком глинистого грунта.

В данной серии опытов были выполнены испытания глины, физические свойства которой приведены в табл. 2. Результаты испытаний представлены на рис. 16, 17, 18.

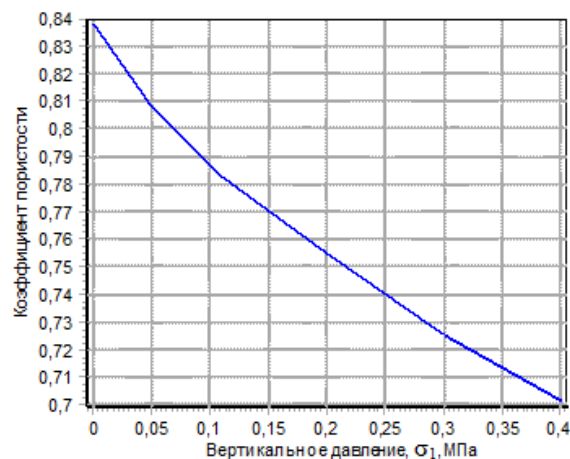


Рис. 16. График зависимости коэффициента пористости глины от вертикального давления

Используя компрессионную зависимость (см. рис. 16), можно определить давление предварительного уплотнения σ_p , которое испытывал грунт при своем природном формировании. Для этого были применены два метода, предложенные Казагранде и Беккером [7, 8]. Результаты дали близкие значения: σ_p – 149 и 139,1 кПа (см. рис. 17, 18). Среднее значение из шести испытаний равно 138 кПа. Это давление используется в расчетах оснований для определения границы упругого и неупругого поведения. Полагают, что превышение действующими напряжениями величины давления предварительного уплотнения характеризуется полным разрушением структуры материала.

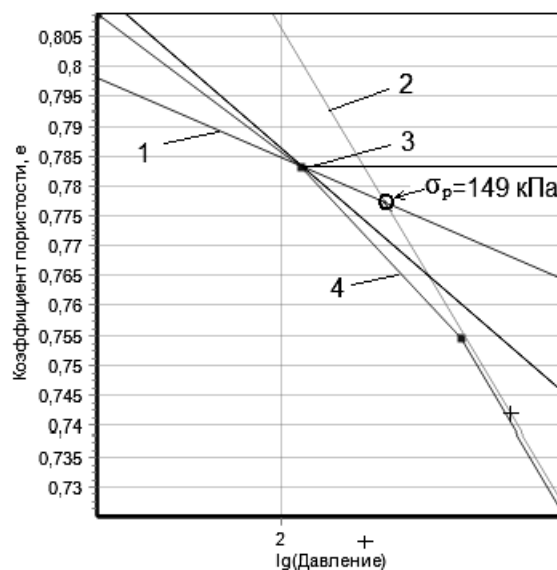


Рис. 17. Определение давления предварительного уплотнения методом Казагранде:

- 1 – линия биссектрисы; 2 – касательная линия; 3 – точка максимальной кривизны;
- 4 – компрессионная зависимость

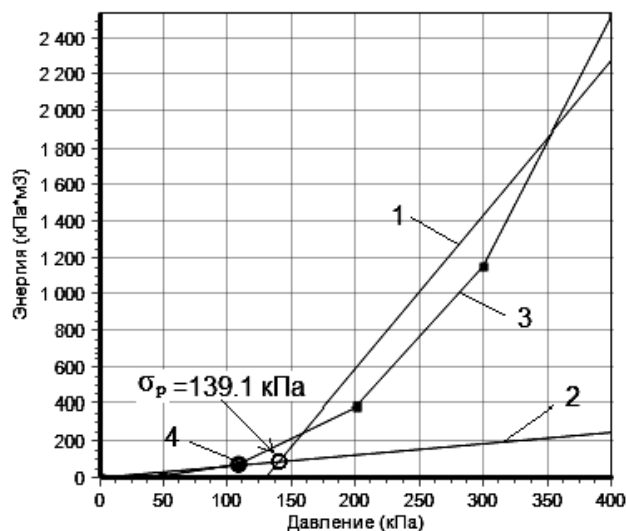


Рис. 18. Определение давления предварительного уплотнения методом Беккера:

1, 2 – касательные к участкам кривой; 3 – результаты испытаний;
4 – точка максимальной кривизны

Как видно из рис. 16 и табл. 9, 10, коэффициент пористости (объем пор) во всех выполненных испытаниях уменьшается с ростом нормального давления. Начальное значение коэффициента пористости зависит от содержания шлака в грунте: чем больше содержание шлака в грунте, тем больше начальное значение коэффициента пористости (объема пор) в материале.

Т а б л и ц а 9

Значения компрессионного модуля деформации

Нормальное давление σ , МПа	Вертикальная деформация ε	Модуль деформации E_{oed} , МПа	Коэффициент сжимаемости m_o , МПа ⁻¹	Коэффициент пористости e
0	0	0,0	0	0,838
0,049	0,016	1,35	0,586	0,809
0,108	0,030	1,83	0,433	0,783
0,201	0,045	2,55	0,310	0,755
0,300	0,061	2,67	0,296	0,725
0,400	0,074	3,37	0,234	0,702

Т а б л и ц а 10

Значения компрессионного модуля деформации

Нормальное давление σ , МПа	Вертикальная деформация ε	Модуль деформации E_{oed} , МПа	Коэффициент сжимаемости m_o , МПа ⁻¹	Коэффициент пористости e
0	0	0,0	0	1,56
0,050	0,012	2,68	0,6	1,53
0,099	0,017	5,84	0,27	1,52
0,200	0,021	14,3	0,11	1,51
0,299	0,024	22,14	0,07	1,5
0,400	0,026	26,12	0,06	1,49
0,500	0,029	25,99	0,06	1,49
0,599	0,030	38,63	0,04	1,48

В этой же серии опытов были проведены испытания глиношлаковой смеси с 20 %-м содержанием шлака после семи суток твердения. Результаты испытаний представлены на рис. 19.

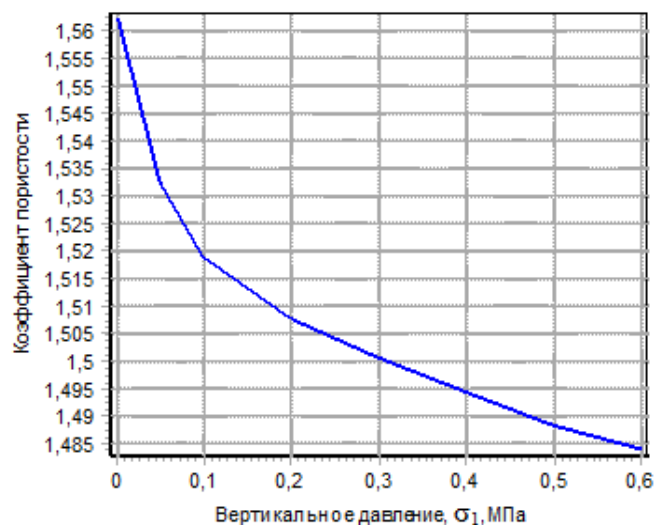


Рис. 19. Зависимость изменения коэффициента пористости от нормального давления для глиношлакового материала при 20 %-м содержании шлака на седьмые сутки твердения

На рис. 20 представлены компрессионные кривые в полулогарифмическом масштабе по оси давлений, $e - \log \sigma$. Точка перелома на данных графиках соответствует переходу от упругого поведения материала к неупругому с возникновением остаточных деформаций. Этот порог определяется прочностью структурных связей в материале и характеризуется параметром σ_p , который используется в различных моделях материалов при численном решении краевых задач.

Используя метод Казагранде, получили значение $\sigma_p = 160$ кПа (см. рис. 20), а метод Беккера (рис. 21) дает значение σ_p , равное 169,4 кПа. Среднее значение из шести испытаний равно 168 кПа.

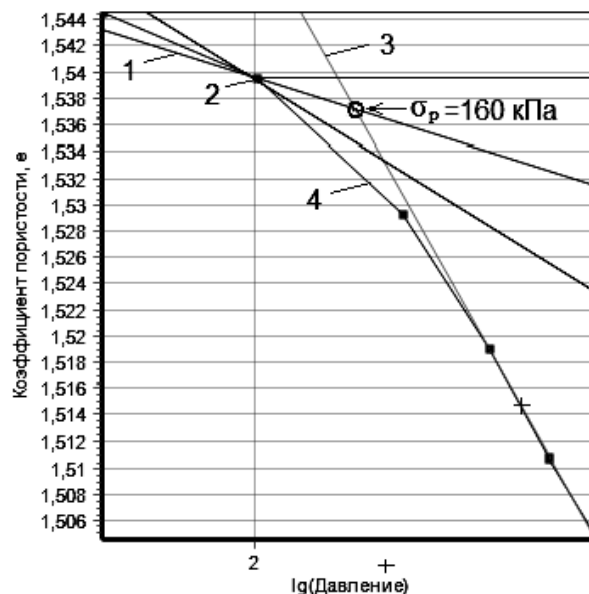


Рис. 20. Определение давления предварительного уплотнения для глиношлакового материала при 20 %-м содержании шлака методом Казагранде:

- 1 — линия биссектрисы; 2 — точка максимальной кривизны; 3 — касательная линия;
- 4 — компрессионная зависимость

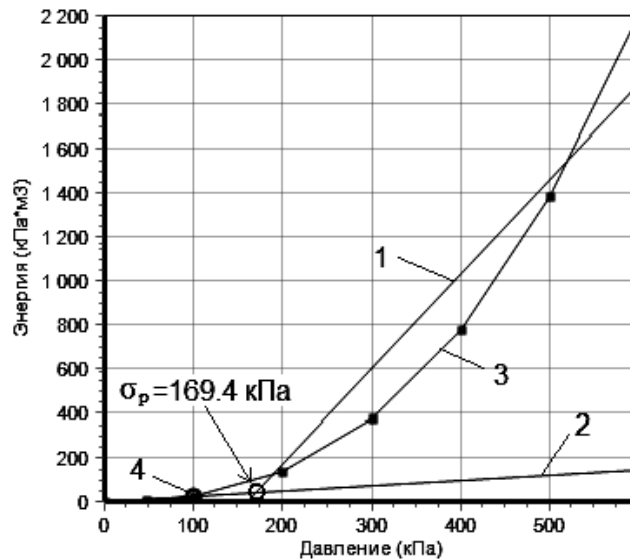


Рис. 21. Определение давления предварительного уплотнения для глиношлакового материала при 20 %-м содержании шлака методом Беккера:

1, 2 – касательные к участкам кривой; 3 – результаты испытаний;
4 – точка максимальной кривизны

Сравнение значений σ_p для глины в природном состоянии и при содержании шлака 20 % указывает на зависимость роста прочности структурных связей с 138 до 168 кПа. Следует учесть, что испытания проводились на седьмые сутки и материал в дальнейшем с течением времени покажет большие значения структурной прочности.

Найденный из опытов модуль деформации отличается от упругого модуля, так как он вычисляется при определенной степени развития неупругих, остаточных деформаций в материале. Этот модуль деформации входит в решения и используется при проектировании оснований зданий и сооружений [9]. Однако найденное из результатов компрессионных испытаний значение модуля деформации приводится к расчетному значению путем умножения его на коэффициент перехода m_k . Значение m_k зависит от вида грунта и изменяется в диапазоне от 1 до 6. В связи с тем что для шлако-грунта этот коэффициент отсутствует, в данной работе его предлагается определять путем сопоставления результатов компрессионных и трехосных испытаний из выражения

$$m_k = \frac{E_{triax}}{E_{oed}}, \quad (14)$$

где E_{triax} – модуль упругости из трехосных испытаний; E_{oed} – модуль деформации из компрессионных испытаний.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 11, указывают на зависимость модуля упругости от метода испытаний или, точнее, от вида напряженного состояния, реализуемого при нагружении образцов материала. В условиях одноосного сжатия, когда возможна свободная деформация образца материала в горизонтальном направлении, модуль упругости (E_{uniax}) получается меньше, чем для того же материала, но при наличии бокового обжатия (E_{triax}). При этом значение модуля упругости в последнем случае возрастает с ростом величины бокового обжатия $\sigma_2 = \sigma_3$ с 96,68 до 342,15 МПа в выполненных исследованиях.

Механические свойства глинистого грунта в природном состоянии и глиношлакового композита при содержании шлака 20 % и времени твердения 7 суток

Методы испытаний	Механические свойства глинистого грунта в природном состоянии					Механические свойства глиношлакового композита при содержании шлака 20 % и времени твердения 7 сут				
Компрессионное сжатие	Модуль деформации E_{oed} , МПа, при различных диапазонах нагрузки, МПа									
	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5
	1,9	2,67	3,35	4,45	5,1	11,1	15,45	19,41	31,37	42,34
Одноосное сжатие	R , кПа	c_u , кПа	E_{uniax} , МПа		R , кПа			E_{uniax} , МПа		
	18,4	9,2	8,59		540,0			96,68		

В ы в о д ы :

1. Значение прочности на одноосное сжатие глины с естественной структурой равно $R = 0,184$ МПа. Недренированная прочность $C_u = R / 2 = 0,92$ МПа. Коэффициент Пуассона $\nu = \Delta \epsilon_3 / \Delta \epsilon_1 = 0,123$. Модуль упругости, найденный на начальном участке зависимости «деформация – напряжение», составляет $E = \Delta \sigma_1 / \Delta \epsilon_1 = 8,59$ МПа.

2. Установлена зависимость прочности от содержания шлака и от времени в глиношлаковой смеси. Кинетика набора прочности зависит от времени, что свидетельствует о явно выраженной линейной зависимости. Модуль упругости также линейно возрастает в зависимости от времени твердения.

3. Отмечено повышение прочности и уменьшение деформируемости глиношлаковой смеси с увеличением содержания шлака. В естественном состоянии глина имеет модуль упругости, равный 8,59 МПа, и прочность, равную 0,184 МПа. При 20 %-м содержании шлака на 28-е сутки твердения модуль упругости увеличивается до 524,5 МПа, а прочность на сжатие – до 4,63 МПа. Таким образом, сжимаемость уменьшается почти в 60 раз, а прочность возрастает в 25 раз.

4. Прочность глиношлаковой смеси возрастает до определенного предела с ростом давления предварительного уплотнения. Прочность глины в естественном состоянии равна 0,184 МПа, прочность глиношлаковой смеси без уплотнения составляет 1,0 МПа, а с уплотнением при давлении в 200 кПа – 1,92 МПа. Видно, что процедура предварительного уплотнения в процессе твердения глиношлаковой смеси приводит к росту прочности почти в два раза. Однако в дальнейшем при увеличении давления предварительного уплотнения ожидаемого роста прочности не наблюдается.

5. Точка перелома на графиках компрессионных кривых соответствует переходу от упругого поведения материала к неупругому с возникновением остаточных деформаций. Этот порог определяется прочностью структурных связей в материале и характеризуется параметром σ_p , который используется в различных моделях материалов при численном решении краевых задач.

6. Найденный из опытов модуль деформации отличается от упругого модуля, так как он вычисляется при определенной степени развития неупругих, остаточных деформаций в материале. Этот модуль деформации входит в решения и используется при проектировании оснований зданий и сооружений. Результаты испытаний указывают на зависимость модуля упругости от метода испытаний или, точнее, от вида напряженного состояния, реализуемого при нагружении образцов материала. В условиях одноосного сжатия, когда возможна свободная деформация образца материала в горизонтальном направлении, модуль упругости получается меньше, чем для того же материала, но при наличии бокового обжатия. При этом значение модуля

упругости в последнем случае возрастает с ростом величины бокового обжатия $\sigma_2 = \sigma_3$ с 96,68 до 342,15 МПа в выполненных исследованиях.

Список литературы

1. ГОСТ 3476–2019. Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов.
2. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
3. ГОСТ 12248.2–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия.
4. ГОСТ 12248.4–2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия.
5. ГОСТ 24452–2023. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.
6. Chin Kheng Ghee. Constitutive behavior of cement treated marine clay: PhD thesis / Chin Kheng Ghee. – Singapore : National University of Singapore, 2006. – 222 p.
7. Болдырев, Г.Г. Лабораторные методы определения механических свойств грунтов : информ. пособие / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов. – Пенза : ПГУАС, 2008. – 40 с.
8. Технологическая механика закрепления и оценки качества глинистых грунтов : моногр. / И.Х. Идрисов, Н.И. Макридин. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 174 с.
9. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. – Москва : Госстрой России, 2004. – 177 с.

References

1. GOST 3476-2019. Blast furnace and electrothermophosphoric granular slags for the production of cements.
2. GOST 5180-2015. Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics.
3. GOST 12248.2–2020. Soils. Determination of strength characteristics by uniaxial compression method.
4. GOST 12248.4–2020. Soils. Determination of deformability characteristics by compression compression method.
5. GOST 24452-2023. Concretes. Methods for determining prismatic strength, modulus of elasticity, and Poisson's ratio.
6. Chin Kheng Ghee. Constitutive behavior of cement treated marine clay: PhD thesis / Chin Kheng Ghee. – Singapore : National University of Singapore, 2006. – 222 p.
7. Boldyrev, G.G. Laboratory methods for determining the mechanical properties of soils: inform. the manual / G.G. Boldyrev, I.H. Idrisov. – Penza : PGUAS, 2008. – 40 p.
8. Technological mechanics of fixing and assessing the quality of clay soils: monographs / I.Kh. Idrisov, N.I. Makridin. – Penza : PGUAS, 2014. – 174 p.
9. SP 50-101-2004. Design and construction of foundations and foundations of buildings and structures. – Moscow : Gosstroy of Russia, 2004. – 177 p.

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

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

Бородин Александр Владимирович,
начальник отдела капитального
строительства ГКУ «Управление
автомобильных дорог Республики
Мордовия»
E-mail: sas-borodin@yandex.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

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

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

Borodin Aleksander Vladimirovich,
Head of the Capital Construction Department
of the State Institution «Road Administration
of the Republic of Mordovia»
E-mail: sas-borodin@yandex.ru

НЕОТВЕРЖДАЕМЫЙ ГЕРМЕТИК ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА ОТКРЫТОМ ВОЗДУХЕ

В.Д. Черкасов, А.В. Бородин

В строительстве широкое применение находят эластичные самоклеящиеся неотверждаемые герметики. В основном их изготавливают из бутилкаучука. При всех своих достоинствах герметики из бутилкаучука неустойчивы к действию ультрафиолетового облучения и озону. Из-за этого их редко применяют при эксплуатации на открытом воздухе при любых погодных условиях.

Перспективным для эксплуатации на открытом воздухе видится использование герметиков на основе этиленпропиленового каучука. В статье приводятся результаты подбора состава герметика на основе этиленпропиленового каучука. Подобрано оптимальное количество полимера, наполнителя, пластификатора и адгезионной добавки.

Ключевые слова: этиленпропиленовый каучук, известняковая мука, индустриальное масло, алкилфенолформальдегидная смола, герметик

NON-CURING SEALANT FOR OUTDOOR USE

V.D. Cherkasov, A.V. Borodin

Elastic self-adhesive non-hardening sealants are widely used in construction. They are mainly made of butyl rubber.

Despite of all their advantages, butyl rubber sealants are not resistant to ultraviolet radiation and ozone. Because of this, they are rarely used for outdoor use in all weather conditions.

The use of sealants based on ethylene propylene rubber seems promising for outdoor use. The article presents the results of selecting the composition of a sealant based on ethylene propylene rubber. The optimal amount of polymer, filler, plasticizer and adhesive additive has been selected.

Keywords: ethylene propylene rubber, limestone flour, industrial oil, alkylphenol formaldehyde resin, sealant

Введение. В строительстве и других отраслях промышленности широко используются герметики [1]. Их применяют для заделки межпанельных стыков, стыков в стеклопакетах, изоляции теплосетей и других соединений. Широкое распространение из всех видов герметиков получили неотверждаемые, которые в основном изготавливают из бутилкаучука [2]. Эти материалы эластичные, самоклеящиеся, обладающие гидроизолирующими, пароизоляционными свойствами, стойкостью к действию агрессивных сред, грибоустойкостью, высокой физической стабильностью и адгезией к металлу и бетону [3–7]. Однако герметики на основе бутилкаучука неустойчивы к

УФ-облучению и озону. Из-за этого их применяют в строительстве ограниченно, особенно при эксплуатации на открытом воздухе при любых погодных условиях.

Перспективным видится использование в строительстве, особенно при устройстве мягких кровель, неотверждаемого герметика на основе этиленпропиленового каучука (СКЭПТ) [8–14]. Это вызвано тем, что этиленпропиленовый каучук обладает высокой стойкостью к УФ-облучению, озону, отсутствует хладотекучесть. Однако герметик на основе этиленпропиленового каучука обладает неудовлетворительной адгезией к большинству субстратов. Поэтому является актуальным разработка герметиков на основе этиленпропиленового каучука с высокой адгезией к различным субстратам и повышенной прочностью.

Методы и материалы. Для изготовления герметика принят этиленпропиленовый каучук СКЭПТ-50 (ТУ2294-022-05766801-2002) производства ОАО «Нижнекамскнефтехим». Пластификатором в разрабатываемых композициях служило индустриальное масло И-40 (ГОСТ 20799-88 «Масла индустриальные. Технические условия»). В качестве адгезионной добавки использовали алкилформальдегидную смолу АФФС SP-1045 производства «SI Group» Франция. В качестве наполнителя – известняковую муку марки «А» (ООО «ЗИМ», Кировская область).

Определение прочности связи с металлом при отслаивании проводили в соответствии с ГОСТ 21981-76 «Герметики. Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании».

При испытании использовали железную сетку №7 по ГОСТ 3826-82 «Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия» и пластины металлические Ст 3, размером (100×25×2) мм.

Основными составляющими неотверждаемых герметиков являются каучук, наполнитель и пластификатор.

Для исследования влияния наполнителя на прочность связи с металлом при отрыве были приняты следующие составы композиции (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Составы композиций

№ композиции	Кол-во СКЭПТ, мас.ч.	Кол-во известняковой муки, мас.ч.	Кол-во индустриального масла, мас.ч.
1	100	150	30
2	100	300	60
3	100	450	90
4	100	600	120

Результаты и обсуждения. Результаты исследований представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что увеличение количества известняковой муки до 400 мас.ч. приводит к повышению прочности связи с металлом. Это вызвано тем, что при увеличении количества наполнителя возрастает площадь контактов, что приводит к усиливающему эффекту наполнителя. В результате дальнейшего увеличения его количества резко снижается прочность связи с металлом при отрыве. Это вызвано тем, что количества полимера не хватает для связывания наполнителя.

Таким образом, оптимальное количество наполнителя в составе должно быть не более 400 мас.ч.

Одним из основных требований, предъявляемых к герметикам, является высокая адгезия к различным материалам. Необходимым компонентом, обеспечивающим высокую и длительную адгезию невысыхающих композиций на основе СКЭПТ к различным субстратам в условиях эксплуатации, являются адгезионные добавки [6, 7]. В качестве адгезионных добавок используют канифоль, её эфиры, фенолформальдегидные, иденкумароновые, эпоксидные и полиэфирные смолы. Для разработки состава герметика в качестве пластификатора приняли индустриальное масло И-40, а в качестве адгезионной добавки – фенолформальдегидную смолу АФФС.

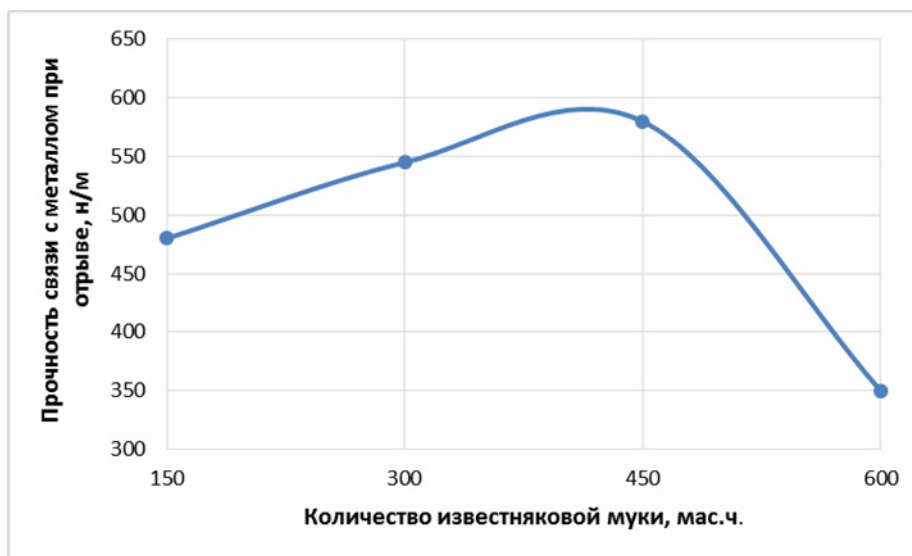


Рис. 1. Влияние количества известняковой муки на прочность связи с металлом при отрыве

Для установления необходимого количества этих компонентов использовали метод математического планирования эксперимента. При этом количество каучука приняли 100 мас.ч., а известняковой муки – 400 мас.ч. Эти компоненты не изменялись в процессе эксперимента.

В качестве первого фактора (X_1) приняли количество масла, которое варьировалось в следующих пределах: 60, 80, 100 мас.ч., вторым фактором (X_2) было количество смолы, которое варьировалось в пределах 20, 30, 40 мас.ч., критерием оценки качества состава приняли прочность связи с металлом при отслаивании.

Матрица планирования и рабочая матрица приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Матрица планирования и рабочая матрица

№ опыта	Матрица планирования		Рабочая матрица		Прочность связи с металлом при отслаивании, Н/м
	X_1	X_2	Количество масла, мас.ч.	Количество смолы, мас.ч.	
1	+1	+1	100	40	190
2	0	+1	80	40	430
3	-1	+1	60	40	780
4	+1	0	100	30	24
5	0	0	80	30	930
6	-1	0	60	30	78
7	+1	-1	100	20	24
8	0	-1	80	20	255
9	-1	-1	60	20	145

После проведения испытаний и статистической обработки результатов эксперимента получено уравнение регрессии:

$$R_1 = 930 - 27X_1 + 87,5X_2 - 879X_1^2 - 117,25X_1X_2 - 587,5X_2^2 + 112,75X_1^2X_2 - 150,75X_1X_2^2 + 821,25X_1^2X_2^2. \quad (1)$$

Графические зависимости изменения прочности связи с металлом при отслаивании от количественного содержания компонентов, построенные по уравнению регрессии, приведены на рис. 2.

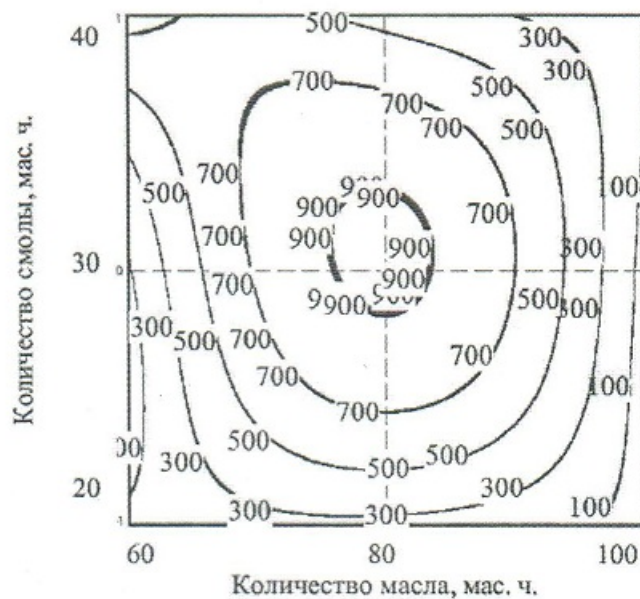


Рис. 2. Влияние количества масла и смолы на прочность связи с металлом при отслаивании

Неотверждаемые герметики на основе неполярных каучуков содержат большое количество пластификатора. Пластификаторы оказывают влияние на весь комплекс свойств герметиков и особенно на прочность.

Проведенные исследования показали, что увеличение содержания пластификатора до 80 мас.ч. повышает прочность связи с металлом при отслаивании (рис. 3). Дальнейшее увеличение количества пластификатора приводит к снижению прочности. Это вызвано тем, что увеличение содержания пластификатора на границе раздела фаз ослабляет уровень межфазных взаимодействий между эластомером и наполнителем. Оптимальное количество пластификатора составляет 80 мас.ч.

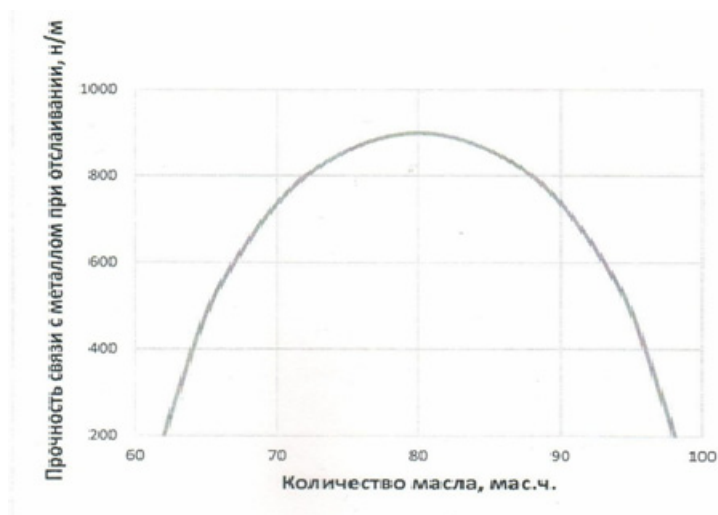


Рис. 3. Влияние количества масла на прочность связи с металлом при отслаивании при содержании смолы 30 мас.ч.

Введение смолы АФФС в композицию до 30 мас.ч. приводит к увеличению прочности (рис. 4). Это связано с усиливающим действием смолы, вызванным образованием армирующей матрицы. Образование армирующей матрицы обусловлено взаимодействием метилольных групп и ароматических фрагментов АФФС с гидроксильными группами субстрата с образованием физических и химических связей. Увеличение содержания смолы выше 30 мас.ч. приводит к тому, что смола не вступает

в реакцию и остаётся свободной в композиции. В результате этого происходит снижение прочности связи с металлом при отслаивании.

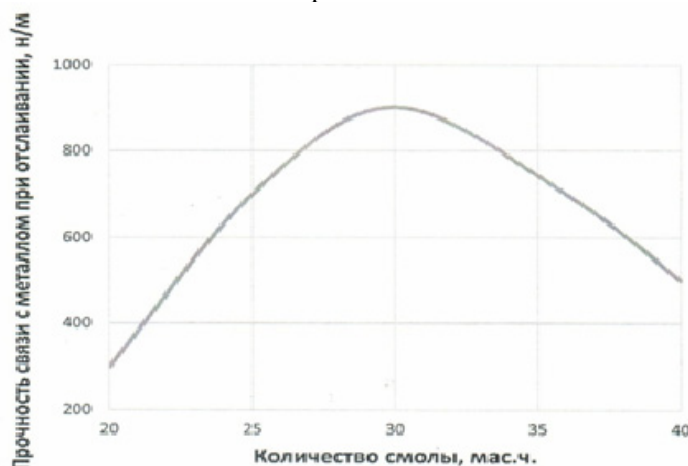


Рис. 4. Влияние количества смолы на прочность связи с металлом при отслаивании при содержании масла 80 мас.ч

В результате проведенных исследований разработан состав герметика, который включает 100 мас.ч. СКЭПТ, 400 мас.ч. известняковой муки, 80 мас.ч. индустриального масла, 30 мас.ч. смолы АФФС.

Вывод. Разработан состав герметика для эксплуатации на открытом воздухе. По адгезионной прочности герметик удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Список литературы

1. Хозин, В.Г. Строительные герметики. Условия эксплуатации, требования к свойствам/ В.Г. Хозин // Труды науч.-практ. конф. «Производство и потребление герметиков и других строительных композиций: состояние и перспективы». – Казань, 1997. – С. 9–20.
2. Иваненко, Т.А. Самоклеящиеся материалы и их применение при переработке пластмасс/ Т.А. Иваненко, Л.И. Колбутова // Клеи. Герметики. Технологии. – 2006. – №3. – С. 19–22.
3. Галимзянова, Р.Ю. Влияние состава на реологические характеристики композиций на основе бутилкаучука / Е.А. Кузнецова, Р.Ю. Галимзянова, Т.В. Макаров, Ю.Н. Хакимуллин, С.И. Вольфсон // Материалы XIV Всероссийской конференции «Структура и динамика молекулярных систем». – Москва-Йошкар-Ола-Уфа-Казань, 2007. – С. 126.
4. Галимзянова, Р.Ю. Влияние состава на свойства композиций на основе бутилкаучука / Р.Ю. Галимзянова, Т.В. Макаров, Ю.Н. Хакимуллин, С.И. Вольфсон // Вестник Казанского технологического университета. – 2007. – №2. – С. 52–57.
5. Галимзянова, Р.Ю. Влияние технологических добавок на реологические свойства композиций на основе бутилкаучука / Р.Ю. Галимзянова, Т.В. Макаров, Ю.Н. Хакимуллин, С.И. Вольфсон // Каучук и резина. – 2008. – №2 – С. 20–22.
6. Артамонова, Т.А. Герметизация кровли герметиками серии Абрис / Т.А. Артамонова, Г.А. Савченкова // Строительные материалы. – 2008. – №6. – С. 13–15.
7. Артамонова, Т.А. Герметики серии Абрис / Т.А. Артамонова // Клеи. Герметики. Технологии. – 2007. – №10. – С. 15–21.
8. Муртазина, Л.И. Влияние пластификаторов на свойства неотверждаемых герметиков на основе этиленпропилендиенового каучука/ Л.И. Муртазина, А.Р. Гарифуллин, И.А. Никульцев, Р.Ф. Фатхуллин, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин// Клеи. Герметики. Технологии. – 2014. – №10. – С. 13–16.

9. Муртазина, Л.И. Регулирование свойств неотверждаемых герметиков на основе этиленпропилендиенового каучука пластификаторами / Л.И. Муртазина, А.Р. Гарифуллин, И.А. Никульцев, Р.Ф. Фатхуллин, Р.А. Ахмедьянова, Д.Г. Милославский, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №9. – С. 119–122.
10. Муртазина, Л.И. Влияние пластификаторов на свойства неотверждаемых герметиков на основе этиленпропилендиенового каучука / Л.И. Муртазина, А.Р. Гарифуллин, И.А. Никульцев, Р.Ф. Фатхуллин, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин // Энциклопедия инженера-химика. – 2014. – №8. – С. 31–36.
11. Муртазина, Л.И. Влияние природы пластификаторов на свойства неотверждаемых герметиков на основе этиленпропилендиенового каучука / Л.И. Муртазина, А.Р. Гарифуллин, И.А. Никульцев, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин // Четвертые Воскресенские научные чтения «Полимеры в строительстве» : материалы научных трудов. – Казань, 2014. – С. 57.
12. Муртазина, Л.И. Влияние пластификаторов на свойства неотверждаемых герметиков на основе этиленпропилендиенового каучука / Л.И. Муртазина, А.Р. Гарифуллин, И.А. Никульцев, Р.Ф. Фатхуллин, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин // Полимеры в строительстве. – 2014. – №2. – С. 78–90.
13. Муртазина, Л.И. Неотверждаемые герметики высокого наполнения на основе этиленпропилендиенового каучука / Л.И. Муртазина, А.Р. Гарифуллин, И.А. Никульцев, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №24. – С. 71–73.
14. Муртазина, Л.И. Неотверждаемые герметики на основе этиленпропилендиенового каучука / Л.И. Муртазина, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин // Материалы международной научно-технической конференции «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырье, технологии». – Нижний Новгород, 2013. – С. 217.

References

1. Khozin, V.G. Construction sealants. Operating conditions, requirements for properties / V.G. Khozin // Proceedings of the scientific-practical conf. «Production and consumption of sealants and other construction compositions: status and prospects». – Kazan, 1997. – P. 9–20.
2. Ivanenko, T.A. Self-adhesive materials and their application in plastics processing / T.A. Ivanenko, L.I. Kolbutova // Adhesives. Sealants. Technologies. – 2006. – No. 3. – P. 19–22.
3. Galimzyanova, R.Yu. Influence of composition on the rheological characteristics of butyl rubber-based compositions / E.A. Kuznetsova, R.Yu. Galimzyanova, T.V. Makarov, Yu.N. Khakimullin, S.I. Wolfson // Materials of the XIV All-Russian Conference “Structure and Dynamics of Molecular Systems”. – Moscow-Yoshkar-Ola-Ufa-Kazan, 2007. – P. 126.
4. Galimzyanova, R.Yu. Influence of composition on the properties of compositions based on butyl rubber / R.Yu. Galimzyanova, T.V. Makarov, Yu.N. Khakimullin, S.I. Wolfson // Bulletin of Kazan Technological University. – 2007. – No. 2. – P. 52–57.
5. Galimzyanova, R.Yu. The influence of technological additives on the rheological properties of compositions based on butyl rubber / R.Yu. Galimzyanova, T.V. Makarov, Yu.N. Khakimullin, S.I. Wolfson // Rubber and Rubber. – 2008. – №2 – P. 20–22.
6. Artamonova, T.A. Sealing of roofs with sealants of the Abris series / T.A. Artamonova, G.A. Savchenkova // Construction materials. – 2008. – №6. – P. 13–15.
7. Artamonova, T.A. Sealants of the Abris series / T.A. Artamonova // Adhesives. Sealants. Technologies. – 2007. – №10. – P. 15–21.
8. Murtazina, L.I. Influence of plasticizers on the properties of non-curing sealants based on ethylene propylene diene rubber / L.I. Murtazina, A.R. Garifullin, I.A. Nikultsev,

R.F. Fatkhullin, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin // Adhesives. Sealants. Technologies. – 2014. – №10. – P. 13–16.

9. Murtazina, L.I. Regulating the properties of non-curing sealants based on ethylene propylene diene rubber with plasticizers / L.I. Murtazina, A.R. Garifullin, I.A. Nikultsev, R.F. Fatkhullin, R.A. Akhmedyanova, D.G. Miloslavsky, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin // Bulletin of Kazan Technological University. – 2014. – No. 9. – P. 119–122.

10. Murtazina, L.I. The influence of plasticizers on the properties of non-curing sealants based on ethylene propylene diene rubber / L.I. Murtazina, A.R. Garifullin, I.A. Nikultsev, R.F. Fatkhullin, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin // Encyclopedia of a chemical engineer. – 2014. – No. 8. – P. 31–36.

11. Murtazina, L.I. The influence of the nature of plasticizers on the properties of non-curing sealants based on ethylene propylene diene rubber / L.I. Murtazina, A.R. Garifullin, I.A. Nikultsev, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin // The fourth Resurrection scientific readings “Polymers in construction” Materials of scientific works. – Kazan, 2014. – P. 57.

12. Murtazina, L.I. The influence of plasticizers on the properties of non-curing sealants based on ethylene propylene diene rubber / L.I. Murtazina, A.R. Garifullin, I.A. Nikultsev, R.F. Fatkhullin, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin // Polymers in construction. – 2014. – No. 2. – P. 78–90.

13. Murtazina, L.I. Non-curing high-fill sealants based on ethylene propylene diene rubber / L.I. Murtazina, A.R. Garifullin, I.A. Nikultsev, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin // Bulletin of Kazan Technological University. – 2013. – No. 24. – P. 71–73.

14. Murtazina, L.I. Non-curing sealants based on ethylene propylene diene rubber / L.I. Murtazina, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin // Proceedings of the international scientific and technical conference «Modern achievements in the field of adhesives and sealants. Materials, raw materials, technologies». – Nizhny Novgorod, 2013. – P. 217.

УДК 666.972

DOI 10.54734/20722958_2025_2_31

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Управление
территориями»
E-mail: tarov60@mail.ru

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: +7 (8452) 99-86-03;
факс: +7 (8452) 99-86-04

Ивашенко Юрий Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные материалы,
конструкции и технологии»
E-mail: kafedra.smkt@gmail.com

Национальный исследовательский университет «Московский государственный строительный университет»

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел.: +7 (495) 781-80-07,
факс: +7 (499) 183-44-38;

Ерофеева Ирина Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Основы архитектуры
и художественных коммуникаций»
E-mail: ira.erofeeva.90@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

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Professor, Decan of the
faculty «Management of Territories»
E-mail: tarov60@mail.ru

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin

Russia, 410054, Saratov, 77,
Politechnicheskaya St.,
tel.: +7 (8452) 99-86-03;
fax: +7(8452) 99-86-04

Ivashchenko Yuri Grigorievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Building Materials, Structures
and Technologies»
E-mail: kafedra.smkt@gmail.com

National Research University «Moscow State University of Civil Engineering»

Russia, 129337, Moscow,
26, Yaroslavskoe shosse,
tel.: +7 (495) 781-80-07,
fax: +7 (499) 183-44-38;

Erofeeva Irina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Fundamentals of
Architecture and Artistic Communications»
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ ХИМИЧЕСКИХ МОДИФИКАТОРОВ

О.В. Тараканов, Ю.Г. Ивашенко, И.В. Ерофеева

Рассмотрены вопросы формирования кристаллизационных структур с позиций химического состава жидкой фазы цементных систем и влияния добавок на процессы гидратации. Экспериментально установлено пластифицирующее влияние добавок-ускорителей твердения на основе хлоридов натрия и кальция. Разработаны составы бетонов нового поколения с использованием тонкомолотых песков, микрокремнезема и суперпластификаторов.

Ключевые слова: цементные системы, добавки-ускорители твердения, пластификация, микроструктура, кристаллообразование, микронаполнители, высокопрочные бетоны

FORMATION OF CEMENT MATERIALS MICROSTRUCTURE IN THE PRESENCE OF CHEMICAL MODIFIERS

O.V. Tarakanov, Y.G. Ivashchenko, I.V. Erofeeva

The issues of formation of crystallization structures from the standpoint of the chemical composition of the liquid phase of cement systems and the effect of additives on hydration processes

are considered. The plasticizing effect of hardening accelerator additives based on sodium and calcium chlorides has been experimentally established. Concrete compositions of new generation using finely ground sands, silica and superplasticizers have been developed.

Keywords: cement systems, additives, hardening accelerators, plasticization, microstructure, crystallization, micro-fillers, high-strength concretes

В современных бетонах, особенно в бетонах нового поколения, значительно возрастает роль химических модификаторов и микронаполнителей. Наибольшей популярностью пользуются пластифицирующие (супер- и гиперпластификаторы (СП и ГП)) противоморозные органоминеральные добавки и активаторы твердения [1, 2]. Вместе с тем следует отметить, что массовое вовлечение химических модификаторов должно сопровождаться анализом механизмов их действия, в значительной степени определяющих основные эксплуатационные свойства и долговечность бетонных и железобетонных конструкций. Применение модифицирующих добавок в основном имеет целью улучшение технологических свойств бетонных смесей (пластичность, удобоукладываемость, сохраняемость подвижности) и обеспечение набора требуемой прочности в начальные сроки твердения. Современные противоморозные добавки делятся на два больших класса. К первому относятся добавки для «теплого» бетона, т.е. обеспечивающие твердение в условиях отрицательных температур при соответствующем уходе за твердеющим бетоном (паро- и электропрогрев, тепляки и т.д.). Ко второму – добавки, обеспечивающие твердение бетона на морозе без специальных методов обогрева. Последние, как правило, используются при повышенных дозировках (в пределах 5-7 % от массы цемента).

Цементные системы являются достаточно сложными с точки зрения анализа гидратационных процессов и механизмов формирования коагуляционных и кристаллизационных структур [3]. Введение химических добавок в цементные системы еще в большей степени осложняет гидратацию и твердение цементных материалов, поэтому анализу механизмов действия добавок в условиях диссипативных гидратационных систем следует уделять значительно большее внимание. Химические добавки, особенно комплексные, являются достаточно сложными системами с точки зрения их химического поведения в водной среде: положительная и отрицательная гидратация ионов, координационные числа ионов, формирование аквакомплексов и многое другое. В присутствии гидратирующихся цементных минералов эти процессы еще больше осложняются вследствие изменения состава жидкой фазы при гидратации минералов цемента. Параллельно с процессами растворения протекают процессы формирования коагуляционных и ранних кристаллизационных структур, при которых гидратирующиеся диссипативные системы постоянно переходят из одного состояния в другое [4]. Химические добавки оказывают влияние на всех стадиях гидратации и твердения цементных систем. С начала водозатвердения они изменяют ионную структуру жидкой фазы, что отражается на процессах формирования твердеющих структур.

Агрегативная устойчивость цементных систем может значительно изменяться в присутствии химических добавок. В наших исследованиях установлено, что некоторые электролиты (NaCl , KCl , CaCl_2) способствуют повышению пластичности смесей в диапазоне дозировок 3-5 % от массы цемента. Однако в последующий период (1,5-2 часа после водозатвердения), вследствие активации образования ранних кристаллизационных гидроалюминатных структур (AFm- и Aft-фаз) и псевдокристаллических структур C-S-H, цементные системы теряют подвижность. В то же время эти процессы можно регулировать посредством использования совместно с электролитами пластифицирующих добавок (рис. 1).

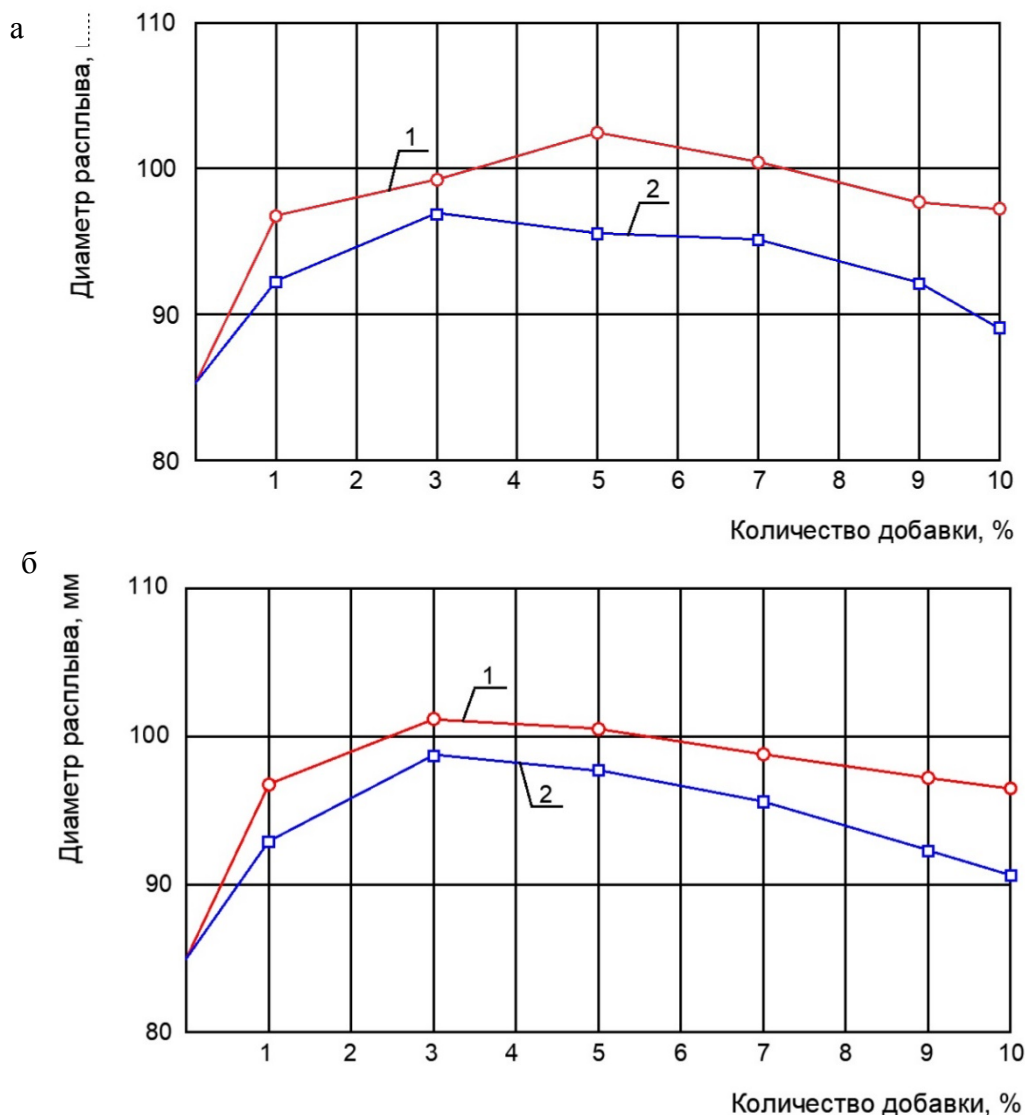


Рис. 1. Влияние добавок-ускорителей твердения на пластификацию цементных суспензий:
а – ЦЕМ I 42,5Н; б – ЦЕМ I 32,5Н;

1 – с добавкой на основе хлорида натрия; 2 – с добавкой на основе хлорида кальция

Ионы, находящиеся в жидкой фазе цементных систем, можно условно разделить на 2 группы:

- ионы, воздействующие на зарядовое состояние поверхности, участвующие в ионообменных реакциях и способные встраиваться в кристаллическую решетку гидратных фаз. В основном это относится к процессам кристаллизации двойных солей гидратов с участием гидроалюминатных фаз. Для гидросиликатных фаз подобные ионы могут влиять на структуру кристаллизационных мотивов;

- индифферентные ионы, не воздействующие на заряд поверхности.

Введение активных ионов сказывается на состоянии двойного электрического слоя и на степени структурирования граничных водных слоев, и, как следствие, это отражается на коллоидно-химических и конденсационных процессах. Например, коагулирующим действием обладают ионы с противоположным зарядом по отношению к заряду поверхности частиц, и их действие тем интенсивнее, чем выше валентность и больше условный радиус [5].

Касаясь гидроалюминатных структур, следует отметить, что как катионы, так и анионы могут оказывать поляризующее действие на структуру межслоевой воды в гидратах AFm-фаз, следствием чего является их стабилизация и замедление процессов

перекристаллизации в наиболее термодинамически устойчивые фазы, например C_3AH_6 .

С увеличением дозировок добавок стабилизирующее влияние электролитов усиливается. Одной из причин существенного различия скоростей образования гидроалюминатов кальция и двойных солей-гидратов в присутствии добавок является специфика поведения как катионов, так и анионов в водных растворах, обусловленная их различными электронным строением и размерами и, как следствие, различным влиянием на поляризацию воды и изменение ее свойств, в том числе и в структуре гидратов.

Рассматривая процессы гидратации ионов, следует учитывать, что изменение скорости трансляционного движения молекул воды вокруг катиона и, следовательно, изменение её вязкости главным образом связано с электронным строением гидратированного катиона или аниона. Так, ядро катиона калия, имеющего электронную конфигурацию $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 4S^1$, в отличие от ядра катиона натрия (электронная конфигурация $1S^2 2S^2 2P^6 3S^1$), дополнительно экранировано электронным слоем $3S^2 3P^6$, вследствие чего валентный электрон $4S^1$ катиона калия более удален от ядра и имеет с ним меньшую связь, чем валентный электрон $3S^1$ катиона натрия. Об этом свидетельствует потенциал ионизации атомов, зависящий в основном от трех факторов: расстояния электрона от ядра, заряда ядра и экранирования заряда ядра электронами. Для катионов калия и натрия первые потенциалы ионизации I_1 (для удаления первого электрона) равны соответственно 4,339 и 5,138 эв. Валентные электроны у атома кальция, имеющего конфигурацию внешнего электронного слоя $4S^2$, в большей степени связаны с ядром, чем у атомов калия и натрия, и энергии ионизации $Ca^0 \rightarrow Ca^+ \rightarrow Ca^{2+}$ равны соответственно 6,1130 и 11,8714 эв. Внешние электроны у атома магния (конфигурация $3S^2$) имеют большую, чем у атома кальция, связь с ядром, и энергии ионизации $Mg^0 \rightarrow Mg^+ \rightarrow Mg^{2+}$ равны соответственно 7,64607 и 15,0353 эв.

Анализ электронного строения катионов исследуемых добавок позволяет сделать предположение, что в цементных системах, особенно в присутствии повышенных дозировок добавок, характер химического поведения катионов и анионов в растворе становится одним из определяющих факторов, влияющих на скорость образования гидратных фаз, поскольку в присутствии гидратированных ионов изменяются вязкость воды, окружающей ионы, и структура аквакомплексов, что отражается на характере их поляризующего влияния на деформацию и разрыв связей в структуре безводных минералов при гидратации цемента [4].

В цементных системах мы имеем дело с результирующим характером влияния добавок, и предвидеть, в каком направлении он будет изменяться в зависимости от состава вяжущего и условий твердения, достаточно сложно. Тем не менее некоторые закономерности позволяют приблизиться к пониманию механизмов действия добавок.

Рассматривая процессы гидратации силикатов кальция в присутствии хлористых солей, можно предположить, что различный характер их влияния на гидратацию и твердение связан не только с параметрами самих катионов, но также с характером поляризации молекул воды, находящихся вблизи (ближняя поляризация) и на расстоянии (дальняя поляризация) от катионов. Этот фактор, очевидно, следует рассматривать как один из основных, определяющих процессы образования гидратных фаз в присутствии добавок электролитов.

В водном растворе ионы Na^+ , K^+ и Ca^{2+} совершают трансляционные скачки без ближайших молекул воды, а катионы Mg^{2+} перемещаются вместе с окружающими их молекулами. Этот убедительный пример, свидетельствующий о значительно большей степени поляризации молекул воды вблизи катионов Mg^{2+} , позволяет сделать предложение, что количество химически связанной воды в структуре кристаллогидратов определяется характером и силами взаимодействия катионов с молекулами воды.

Рентгенофазовые исследования продуктов гидратации C_4AF с добавками хлористых солей показали, что в присутствии хлорида магния в большей степени, чем с другими добавками, возрастает интенсивность линий C_3AH_6 (5,14; 4,45; 3,37; 3,15; 2,82; 2,30; 2,04; 1,68 Å). Об этом свидетельствует также меньшая прочность составов

C_4AF с добавкой Mg^{2+} по сравнению с другими добавками. Одной из причин снижения прочностных показателей могут являться процессы перекристаллизации метастабильных гидроалюминатов кальция C_2AH_8 , $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$ в кубические C_3AH_6 [6].

Известно, что образующиеся в начальный период гидратации алюминатов кристаллы AFm-фазы имеют слоистую структуру, близкую к структуре $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (СН) и получающуюся из неё при упорядоченном замещении одного иона Ca^{2+} из трех на Al^{3+} или Fe^{3+} . В AFm-фазе с более простой структурой эти элементы скомпонованы таким образом, что образуются октаэдрические полости, окружённые тремя молекулами H_2O от каждого из примыкающих слоёв. Эти полости могут содержать как анионы, так и молекулы воды. Элементарные ячейки всех фаз основаны на гексагональных структурных элементах с $a = 0,57\text{--}0,59$ нм. Эти значения примерно в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем те же расстояния в СН. Толщина слоя зависит от природы аниона и от количества межслоевой воды, которое может меняться при ступенчатой дегидратации из состояния наибольшей гидратации. Существуют фазы AFm, в которых между главными слоями имеется завершённый дополнительный слой молекул H_2O . Многие фазы AFm легко претерпевают изменение в содержании воды и анионный обмен. Некоторые фазы проявляют полиморфизм, возникающий вследствие различных способов сочленения слоёв [3].

В пересыщенных растворах зарождающиеся микрокристаллы присоединяют к себе молекулы из среды чаще, чем происходят их отрыв и выход в среду. Присоединение молекул растворенного вещества к микрокристаллу осуществляется в несколько стадий. При присоединении к микрокристаллу молекула должна переместиться из раствора, адсорбироваться, а затем, двигаясь по поверхности, зацепиться и закрепиться на ней. Если закрепиться не удастся, то молекула снова уходит в раствор. Возможность закрепления зависит от размера, конформационного и электронного строения. В процессе роста кристаллов на их границах образуются дефектные участки, на которых активность молекул выше, чем внутри [4]. При формировании микрокристаллов на поверхности частицы молекулы, поступающие из жидкой фазы, стремятся расположиться таким образом, чтобы их атомы имели максимальное число связей с поверхностью. При формировании гидратов гидроалюминатов кальция на микрокристаллах AFm-фаз образуются двухмерные кластеры, которые, очевидно, зарождаются на выходах краевых дислокаций. Двухмерное кластерообразование характерно для частиц разного размера – от нанометрического до макроскопического, в зависимости от природы и структуры веществ [4]. На рис. 2 отчетливо видно ступенчатое образование слоистых кристаллов AFm-фаз.

При росте кристаллических структур из пересыщенных растворов, в том числе в жидкой фазе цементных систем, в условиях различающихся полей пересыщений, диффузионных вихревых потоков рельеф поверхности кристаллов неоднороден, и на отдельных участках могут образовываться выросты, которые в последующем формируют кристаллизационные мосты между частицами вяжущего или вяжущего и наполнителя и в конечном счете способствуют формированию кристаллизационной сетки, упрочняющей структуру. Подобные мосты зафиксированы в наших исследованиях (рис. 3).

Разработка составов современных бетонных смесей с улучшенными технологическими свойствами и бетонов высокой прочности и долговечности должна осуществляться с учетом механизмов формирования микро- и макроструктуры, ответственных за основные физико-технические свойства материала. Главной задачей является функциональный выбор компонентов с учетом механизмов и условий протекания процессов гидратации и твердения [8-12]. В течение последних лет в строительное производство интенсивно внедряются многокомпонентные бетоны нового поколения. Основной идеей в подобных бетонах является использование супер- и гиперпластификаторов (СП и ГП) совместно с тонкомолотыми минеральными микронаполнителями. Целью применения цементных систем, наполненных минеральными добавками, является создание реологически активной матрицы в цементной системе, способствующей значительному повышению эффективности СП и ГП и, следовательно,

снижению водосодержания смесей, что позволяет получать бетоны нового поколения прочностью 100-120 МПа и выше [13, 14]. Низкая эффективность пластифицирующих добавок в бетонах с малым расходом цемента ($200-300 \text{ кг/м}^3$) объясняется недостаточным количеством тонкодисперсной составляющей, которая и вводится в составы до 100 % от массы цемента с целью увеличения тонкомолотой составляющей, что позволяет в значительно большей степени снижать водосодержание смеси по сравнению с чисто цементной системой.

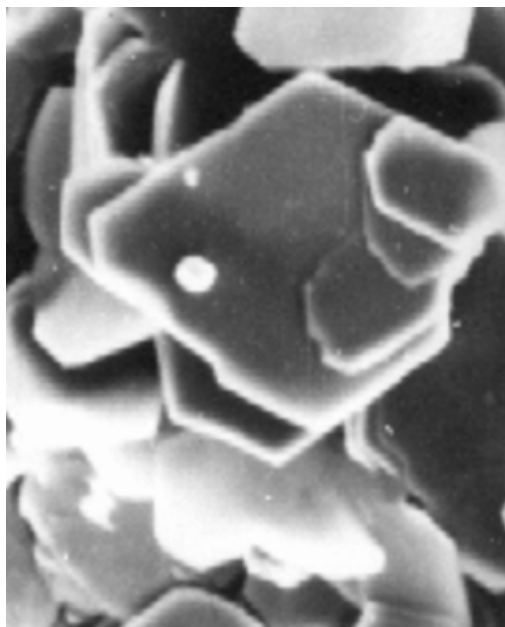


Рис. 2. Рост слоистых кристаллов AFm-фазы при гидратации C_3A ($\times 7000$, 7 сут)

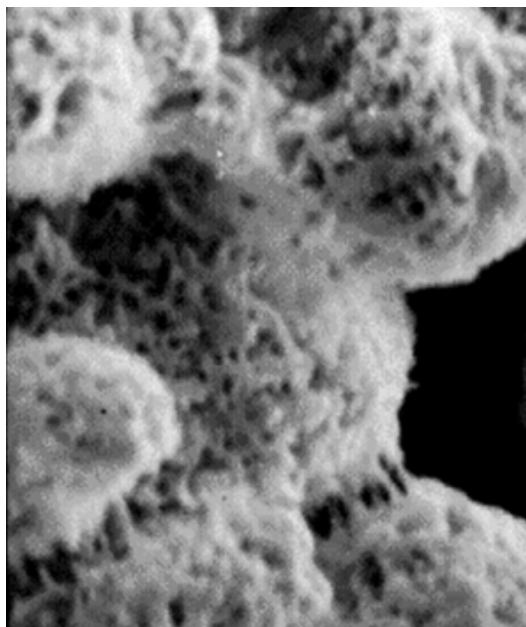


Рис. 3. Образование кристаллизационных мостов между гидратированными частицами C_3S . Сканирующая электронная микроскопия ($\times 7000$, 7 сут)

Перспективным направлением в технологии бетонов нового поколения является использование вместо достаточно дефицитного микрокремнезема тонкомолотых кварцевых песков. Однако следует отметить, что поверхность кварца, находящегося в обычных условиях, всегда гидроксильрована. На поверхности домолотого кварца находятся силоксановые связи. При контакте с водой силоксановые группы с двойной связью становятся неустойчивыми и присоединяют молекулы воды, образуются силанольные группы. В водной среде силанольные группы диссоциируют с отщеплением иона H^+ , в результате чего на поверхности кварца образуются диссоциированные силанольные группы, создающие отрицательный заряд, препятствующий адсорбции отрицательно заряженных молекул СП и ГП. Таким образом, молотые пески практически не подвержены влиянию СП и ГП. Картина меняется при добавлении к кварцевому песку части цемента, и цементно-песчаная смесь эффективно разжижается под действием пластификаторов. Это явление до конца не исследовано. Однако, вероятнее всего, заряд поверхности кварца изменяется, что и является причиной разжижающего действия. Таким образом, тонкомолотые пески можно эффективно использовать в бетонах нового поколения. Авторами была выполнена серия экспериментов по оценке влияния тонкомолотых песков на кинетику твердения и прочность бетонов нового поколения. В качестве микронаполнителей были приняты молотые кварцевые пески, смеси песков различных фракций и микрокремнезем (см. таблицу).

Кинетика твердения и прочность реакционно-порошкового бетона

Состав	Расход материалов, кг/м ³	В/Ц	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии		
				1 сут	7 сут	28 сут
ЦЕМ I 42,5 Н Melflux 1641F 0,8 %	693	0,36	2,182	37	92	113
Песок молотый $S_{уд} = 3050 \text{ см}^2/\text{г}$	332					
Смесь песка фр 0,16-0,315+ фр. 0,315-0,63	990					
Микрокремнезем 8 % от Ц	56					
Вода	250					
ЦЕМ I 42,5 Н Melflux 5581F 0,9 %	636	0,4	2,212	43	72	110
Песок молотый $S_{уд} = 3670 \text{ см}^2/\text{г}$	305					
Песок тонкозернистый фр 0,16-0,63	941					
Микрокремнезем 16 % от Ц	104					
Вода	257					

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование мелких песков совместно с микрокремнеземом и СП позволяет достигать прочности бетона нормального твердения в пределах 100-115 МПа. Важным фактором с точки зрения технологии производства работ является достижение высокой прочности бетона (до 40 МПа) в возрасте 1-2 суток.

Исследование процессов гидратации и твердения сложных многокомпонентных цементных систем в присутствии полифункциональных модифицирующих добавок с позиций анализа их влияния на формирование микроструктуры, кристаллизацию и перекристаллизацию гидратов, состав продуктов гидратации открывает широкие возможности получения композиционных цементных материалов с упорядоченной структурой и заданными физико-техническими свойствами.

Список литературы

1. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – Москва, 2010.
2. ГОСТ 30459-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности. – Москва, 2019.
3. Тейлор, Х.Ф. Химия цементов / Х.Ф. Тейлор. – Москва : Мир, 1996. – 529 с.
4. Мелихов, И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества / И.В. Мелихов. – Москва : БИНОМ, 2006. – 309 с.
5. Тараканов, О.В. Цементные материалы с ускоряющими и противоморозными добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза : ПГУАС, 2003. – 422 с.
6. Тараканов, О.В. Бетоны с модифицирующими добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза : ПГУАС, 2004. – 564 с.

7. Тараканов, О.В. Цементные материалы с добавками углеводородов / О.В. Тараканов. – Пенза : ПГАСА, 2003. – 166 с.
8. Stenechkina, K. The use of superplasticizers in multicomponent concrete mixtures / K. Stenechkina. – DOI: 10.1051/e3sconf/202338901032 // E3S Web of Conferences. Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023). – Chelyabinsk, 2023. – P. 01032.
9. Zheng, S. Experimental study on seismic behaviors of reinforced concrete frame beams in simulated acid environment. Jianzhu Jiegou Xuebao / S. Zheng, Y. Zhang, Y. Huang, Y. Guan, J. Zheng. – DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.09.003 // Journal of Building Structures. – 2017. – Vol. 38. – P. 20–27.
10. Fiertak, M. The growth of fungi and their effect on the behaviour of cementpolymer composites / M. Fiertak, E. Stanaszek-Tomal, A. Kozak. – DOI: 10.1680/adcr.14.00005 // Advances in Cement Research. – 2015. – Vol.27, Issue 6. – P. 340–351.
11. Bulgakow, A. Inspection of flyover bridges using quadrotor / A. Bulgakow, S. Emelianov, T. Bock, D. Sayfeddine, V. Erofeev. – DOI: 10.22260/ISARC2015/0060 // 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining: Connected to the Future, Proceedings. – 2015. – P. 43758–43762.
12. Shafigullin, L.N. Calculation of reinforced concrete shell of positive Gaussian curvature, given different resistance of concrete and cracking / L.N. Shafigullin, A.A. Treschev, V.G. Telichko, V.T. Erofeev. – DOI:10.22630/PNIKS.2018.27.4.46 // Astra Salvensis. – 2017. – P. 77–91.
13. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 4. – С. 30–36: ил. (Строительные материалы и изделия). – ISSN 0536-1052.
14. Erofeev, V. Chemical, physical, fresh and mechanical properties of modified biocidal cements / V. Erofeev, S. Gladkin, A. Rodin, S. Karpushin, I. Erofeeva, Ya. Sanyagina, S. Klyuev, A. Klyuev, Yu. Liseitsev, R. Fediuk. – DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106649 // Structures. – 2024. – Vol. 64. – P. 106649.

References

1. 1GOST 24211-2008. Additives for concrete and mortar. General technical conditions. Moscow, 2010.
2. GOST 30459-2008. Additives for concrete and mortar. Definition and evaluation of efficiency. – Moscow, 2019.
3. Taylor, H.F. Chemistry of cements / H.F. Taylor. – Moscow : Mir, 1996. – 529 p.
4. Melikhov, I.V. Physico-chemical evolution of a solid substance / I.V. Melikhov. – Moscow : BINOM, 2006. – 309 p.
5. Tarakanov, O.V. Cement materials with accelerating and antifreeze additives based on recycled raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza : PGUAS, 2003. – 422 p.
6. Tarakanov, O.V. Concretes with modifying additives based on recycled materials / O.V. Tarakanov. – Penza : PGUAS, 2004. 564 p.
7. Tarakanov, O.V. Cement materials with added carbohydrates / O.V. Tarakanov. – Penza : PGASA, 2003. 166 p.
8. Stenechkina, K. The use of superplasticizers in multicomponent concrete mixtures / K. Stenechkina. – DOI: 10.1051/e3sconf/202338901032 // E3S Web of Conferences. Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023). – Chelyabinsk, 2023. – P. 01032.
9. Zheng, S. Experimental study on seismic behaviors of reinforced concrete frame beams in simulated acid environment. Jianzhu Jiegou Xuebao / S. Zheng, Y. Zhang, Y. Huang, Y. Guan, J. Zheng. – DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.09.003 // Journal of Building Structures. – 2017. – Vol. 38. – P. 20–27.

10. Fiertak, M. The growth of fungi and their effect on the behaviour of cementpolymer composites / M. Fiertak, E. Stanaszek-Tomal, A. Kozak. – DOI: 10.1680/adcr.14.00005 // *Advances in Cement Research*. – 2015. – Vol.27, Issue 6. – P. 340–351.
11. Bulgakow, A. Inspection of flyover bridges using quadrotor / A. Bulgakow, S. Emelianov, T. Bock, D. Sayfeddine, V. Erofeev. – DOI: 10.22260/ISARC2015/0060 // *32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining: Connected to the Future, Proceedings*. – 2015. – P. 43758–43762.
12. Shafigullin, L.N. Calculation of reinforced concrete shell of positive Gaussian curvature, given different resistance of concrete and cracking / L.N. Shafigullin, A.A. Treschev, V.G. Telichko, V.T. Erofeev. – DOI: 10.22630/PNIKS.2018.27.4.46 // *Astra Salvensis*. – 2017. – P. 77–91.
13. Kalashnikov, V.I. Suspension-Napoleon concrete mixtures for powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov // *Vuzov news. Construction*. – 2016. – № 4. – P. 30–36: Il. (Building materials and products). – ISSN 0536-1052.
14. Erofeev, V. Chemical, physical, fresh and mechanical properties of modified biocidal cements / V. Erofeev, S. Gladkin, A. Rodin, S. Karpushin, I. Erofeeva, Ya. Sanyagina, S. Klyuev, A. Klyuev, Yu. Liseitsev, R. Fediuk. – DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106649 // *Structures*. – 2024. – Vol. 64. – P. 106649.

УДК 691:519.7: 001.8

DOI 10.54734/20722958_2025_2_40

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,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
главный редактор РИО
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,
Head 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, editor-in-chief of the
editorial and publishing department
E-mail: fmatem@pguas.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ КАК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ: ОТ БЕРНШТЕЙНА С.Н. ДО МОИСЕЕВА Н.Н.

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

Определены подходы к исследованию сложных систем на основе методов системного анализа при математическом описании явлений и процессов, знания о которых всегда относительно, а описание на любом языке отражает лишь некоторые стороны явлений и не является абсолютно полным. Указаны рациональное сочетание централизма и автономности; структуризация информации, ее верификация и адекватность. Рассмотрены анализ и синтез; всегда видно стремление к анализу – изучению конкретных фактов, вскрытию тонких структур явления. Показано, что при создании синтезирующих теорий происходит некоторая потеря информативности: не всегда удается все факты уложить в единую схему и приспособить к новой системе взглядов. Дана иллюстрация вероятностного метода для управления свойствами композита.

Ключевые слова: сложные системы, композиты, анализ, синтез, методические основы, свойства, управление

METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF STUDYING COMPOSITES AS COMPLEX SYSTEMS: FROM BERNSTEIN S.N. TO MOISEEV N.N.

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

The approaches to the study of complex systems based on the methods of system analysis in the mathematical description of phenomena and processes, knowledge of which is always relative, and the description in any language reflects only some aspects of the phenomena and is not absolutely complete, are determined. The rational combination of centralism and autonomy; structuring of information, its verification and adequacy are indicated. Analysis and synthesis are considered; the desire for analysis is always visible – the study of specific facts, the disclosure of subtle structures of

the phenomenon. It is shown that creating synthesizing theories, some loss of information occurs: it is not always possible to fit all the facts into a single scheme and adapt them to a new system of views. An illustration of a probabilistic method for managing the properties of a composite is given.

Keywords: complex systems, composites, analysis, synthesis, methodological principles, properties, management

Методологией компьютерного моделирования [1–3] является системный анализ (направление кибернетики, общая теория систем), в котором доминирующая роль отводится системным аналитикам; в отличие от математического моделирования на ЭВМ, где методологической основой являются исследование операций, теория математических моделей, теория принятия решений, теория игр и др. *Центральной процедурой системного анализа является построение обобщенной модели, отражающей все факторы и взаимосвязи реальной системы.* Предметом компьютерного моделирования может быть любая сложная система, любой объект или процесс. Категории целей при этом могут быть самыми различными. Компьютерная модель должна отражать все свойства, основные факторы и взаимосвязи реальной сложной системы, критерии, ограничения. Компьютерное моделирование предлагает совокупность методологических подходов и технологических средств, используемых для подготовки и принятия решений в различных областях исследования.

По Моисееву Н.Н., при анализе и синтезе сложных систем все еще остается актуальной систематизация принципов и методов управления. Используемые принципы и методы управления в технических системах предусматривают рациональное сочетание централизма и автономности, повышение их эффективности и оптимальности; структуризацию информации, ее верификацию и адекватность. Централизм и вертикальные связи в сложной системе иерархической структуры являются наиболее важными. Однако излишняя централизация не лишена недостатков и не всегда приемлема. Для перевода во взаимодействие между элементами системы с вертикального принципа на горизонтальные необходима автономность или относительная самостоятельность. Оптимальное соотношение централизма и автономности позволяет принимать стратегические решения по вертикали на верхнем уровне; тактические – по горизонтали в пределах своей компетентности.

В случае больших сложных систем, сформированных по модульному принципу (в том числе и композиционных материалов), легко осуществить декомпозицию системы на сепаратные подсистемы, обладающие определенной степенью автономности (интегративные свойства приближенно можно определить на основе автономных исследований сепаратных подсистем). Здесь каждый элемент иерархической структуры качества системы определяет автономное (без учета всех межсистемных связей) качество сепаратной системы. Результаты автономных исследований модулей можно использовать для определения интегративных свойств (определяются связями между модулями, уровнями и на каждом из уровней; в основном лишь на качественном уровне). Возможность использования результатов автономных исследований сепаратных подсистем при конструировании системы в целом напрямую связана с необходимостью устранения межсистемных связей. Это можно сделать введением настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам. Условия для переноса результатов автономных исследований на систему в целом определяются полнотой понимания процессов формирования структуры и свойств системы [4–8].

Процесс управления заключается в анализе ситуации, выработке и принятии управленческого решения, организации выполнения управленческого решения и итогового контроля, который и замыкает управленческий цикл. На основании результатов оценки субъектом управления выявляем проблему (несоответствие между настоящим и прогнозируемым положениями), а далее переходим к процедуре целеполагания (определение цели системы; цель отражает результат, на достижение которого должна быть направлена система).

В последние годы при решении прикладных задач наряду с классическими детерминистическими принципами особенно широко применяется вероятностный подход. Детерминистическими принципами предполагается, что одно явление (причина) при вполне определенных условиях с необходимостью порождает другие (следствие). Однако, как бы искусно и последовательно ни использовались эти принципы, они все же не позволяют описать многие сложные реальные явления (по Хусрави (перс.-тадж. поэт, X век): «...не загадывай надолго, будь в надеждах осторожен: колесо судьбы коварно, поворот любой возможен»). Более глубокое изучение этих явлений потребовало отказа от детерминистических принципов, то есть отказа от однозначного описания явлений. Вероятностный, или статистический, метод в науке не противопоставляет себя классическому, обычному методу точных наук, а является его дополнением, позволяющим глубже анализировать явления с учетом присущих ему элементов случайности.

Проиллюстрируем сказанное выше на примере оценки эффективности применения некоторой добавки в композиционном материале (A – событие, заключающееся в использовании добавки, B – факт получения необходимых свойств; $P(B|A)$ – вероятность получения необходимых свойств при использовании данной добавки, $P(B|\bar{A})$ – вероятность получения указанных свойств без применения добавки).

Вероятность $P(B|A)$ даёт представление о том, насколько возможно достижение необходимых свойств добавлением этой компоненты. Но, не зная о степени невозможности получить указанные свойства без использования данной компоненты ($P(\bar{B}|\bar{A})$), нельзя судить о степени целесообразности применения добавки.

Поскольку применение добавки субъективно, то при характеристике зависимости между A и B с помощью одного коэффициента его следует выбрать так, чтобы он не изменял своего значения при изменении $P(AB)$ при неизменных значениях $P(B|A)$ и $P(B|\bar{A})$. Отметим, что нельзя вполне охарактеризовать зависимость между событиями с помощью одного числа. Для полной характеристики надо знать 3 числа, которые позволили бы определить вероятности всех 4 совмещений: AB , $A\bar{B}$, $\bar{A}B$, $\bar{A}\bar{B}$.

В известной мере связь между событиями B и A можно охарактеризовать величиной

$$\delta = P(AB) - P(A)P(B),$$

называемой связью между A и B ; в рассматриваемом случае δ оказывается мало-пригодной для оценки эффективности применения добавки (существенно зависит от $P(A)$); $\delta = P(A)P(\bar{A})[P(B|A) - P(B|\bar{A})]$; δ действительно существенно зависит

от $P(A)$ и $P(\bar{A})$; $\rho_B = \frac{\delta}{P(A)P(\bar{A})} = P(B|A) - P(B|\bar{A})$. Часто ρ_B называется

коэффициентом регрессии события B относительно события A ; здесь показывает, насколько увеличивается вероятность получения необходимых свойств, если применяется добавка.

Знание

$$\rho_A = \frac{\delta}{P(B)P(\bar{B})} = P(A|B) - P(A|\bar{B}), \rho_B,$$

$$Q = \frac{\delta}{P(AB)P(\bar{A}\bar{B}) + P(A\bar{B})P(\bar{A}B)} = \frac{P(AB)P(\bar{A}\bar{B}) - P(A\bar{B})P(\bar{A}B)}{P(AB)P(\bar{A}\bar{B}) + P(A\bar{B})P(\bar{A}B)}$$

даёт исчерпывающую характеристику взаимоотношения между A и B , позволяя вычислить вероятности как самих фактов, так и всех совмещений $AB, \bar{A}B, A\bar{B}, \bar{A}\bar{B}$. Если $P(A) = P(B)$, то функция обоих коэффициентов регрессии ρ_A и ρ_B всецело выполняется коэффициентом корреляции R (здесь $R = \rho_A = \rho_B$).

В общем случае, когда $P(A) \neq P(B)$ и ρ_A и ρ_B не даны индивидуально, а даны только $R = \pm\sqrt{\rho_A \rho_B}$ и коэффициент связи Q , эти числа дают также довольно полную картину взаимоотношения между A и B , так как близость коэффициента Q к 1 свидетельствует о том, что, по крайней мере, один из фактов приобретает очень большую вероятность при осуществлении другого, и, смотря по тому, насколько велик коэффициент корреляции, можно судить о том, в какой мере эта зависимость обратима.

Очевидна возможность использования указанных результатов для решения и обратной задачи (задача экспертизы), а именно для определения факта использования добавки при наличии определённых свойств у материала. Так, при

$$P(B|A) = \frac{29}{30}; P(B|\bar{A}) = \frac{26}{30}; P(\bar{B}|A) = \frac{1}{30}; P(\bar{B}|\bar{A}) = \frac{4}{30}$$

имеем

$$\delta = 0,1P(A)P(\bar{A}).$$

Как видим, δ существенно зависит от $P(A)$ и $P(\bar{A})$, то есть от вероятности использования и неиспользования добавки; иначе говоря, связь δ плохо характеризует эффективность применения добавки. Вероятность достижения необходимых свойств при использовании добавки на $\rho_B = 0,1$ больше вероятности получения необходимых свойств без применения добавки.

Коэффициент регрессии

$$\rho_A = P(A|B) - P(A|\bar{B}),$$

но он менее интересен в рассматриваемом случае, ибо показывает, насколько вероятнее применение добавки в случае получения необходимых свойств, чем вероятность использования добавки при отсутствии необходимых свойств; даже знания индивидуальных вероятностей $P(B|A)$, $P(B|\bar{A})$ недостаточно для определения ρ_A . Из

$$\rho_A = \rho_B \cdot \frac{P(A)P(\bar{A})}{P(B)P(\bar{B})}$$

следует, что ρ_A зависит не только от $P(B|A)$, $P(B|\bar{A})$, но ещё и от $P(A)$. Величина ρ_A может оказаться очень малой, если мала вероятность $P(A)$, и очень большой – при большой вероятности $P(A)$. Так, при $P(A) = \frac{3}{4}$, $P(\bar{A}) = \frac{1}{4}$ будем иметь:

$$P(B) = \frac{113}{120}, P(\bar{B}) = \frac{7}{120}, \rho_A = \rho_B \frac{2700}{791} = \frac{270}{791}; R = 0,1848; Q = 0,634 > \rho_B = 0,1.$$

Если бы применение добавки всегда приводило к получению необходимых свойств, то имели бы $P(B|A) = 1$. Откуда

$$P(\bar{B}|A) = 0; P(\bar{B}|\bar{A}) = 1 - P(B|\bar{A}) = \frac{4}{30}; \rho_B = P(B|A) - P(B|\bar{A}) = \frac{4}{30}.$$

При $P(B|A)=1$, $P(B|\bar{A})=\frac{26}{30}$ имеем

$$R = \frac{4}{30} \sqrt{\frac{P(A)}{\frac{4}{30} \left(\frac{26}{30} + \frac{4}{30} P(A) \right)}};$$

R существенно зависит от того, как часто применяется добавка.

При изменении $P(A)$ от 0 до 1 коэффициент корреляции R меняется от 0 до $\sqrt{\frac{4}{30}}$.

Таким образом, знание ρ_A , ρ_B , Q позволяет определить все требуемые вероятности. При этом всегда должны быть соблюдены условия:

$$\begin{aligned} 1 + \rho_B^2 &\geq \frac{2\rho_B}{Q}; \quad 1 + \rho_A^2 \geq \frac{2\rho_A}{Q}; \\ |\rho_A| &\leq \frac{|Q|}{1 + \sqrt{1 + Q^2}}; \quad |\rho_B| \leq \frac{|Q|}{1 + \sqrt{1 + Q^2}}; \\ |R| &\leq \frac{|Q|}{1 + \sqrt{1 + Q^2}}; \quad |Q| \geq \frac{2|R|}{1 + R^2}. \end{aligned}$$

Можно констатировать, что функционирование управляемых объектов должно осуществляться в соответствии с объективными закономерностями различных видов человеческой деятельности: если субъекты управления не вполне знают объекты управления, не считают с их свойствами, получится плохое управление (желаемое качество управления не достижимо). Правильное управление предполагает использование науки и искусства управления, что способствует развитию творческого потенциала при рациональных отношениях между субъектом и объектом управления. В этом случае управление системой не сводится только к достижению цели, а служит средством поддержания целостности сложной системы и стимулирования ее саморазвития.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Основные подходы к компьютерному материаловедению строительных композитных материалов / Ю.М. Баженов, В.А. Воробьев, А.В. Илюхин // Строительные материалы: наука. – 2006. – № 3. – С. 2–4.
2. 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.
3. Королев, Е.В. Динамическое моделирование наноразмерных систем / Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 26–34.
4. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Архитектура и строительство России. – 2020. – № 3. – С. 143.
5. Будылина, Е.А. Системный подход и законы развития: синтез композитов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3 (60). – С. 19–25.
6. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – Vol. 8, № 2. – С. 25–32.
7. Будылина, Е.А. Формирование свойств композитов: от эмпирического подхода к фундаментализации / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1 (58). – С. 33–39.

8. Бudyлина, Е.А. Идентификация и современные парадигмы в материаловедении / Е.А. Бudyлина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 4 (61). – С. 24–28.

References

1. Bazhenov, Yu.M. Basic approaches to computer materials science of building composite materials / Yu.M. Bazhenov, V.A. Vorobyov, A.V. Ilyukhin // Building materials: science. – 2006. – № 3. – P. 2–4.
2. Smirnov, V.A. Stochastic modeling of nanoscale systems / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, S.S. Inozemtsev // Nanotechnology in construction: scientific online journal. – 2012. – Vol. 4, № 1. – P. 6–14.
3. Korolev, E.V. Dynamic modeling of nanoscale systems / E.V. Korolev, V.A. Smirnov, A.S. Inozemtsev // Nanotechnology in construction: scientific online journal. – 2012. – Vol. 4. – № 3. – P. 26–34.
4. Korolev, E.V. Prospects for the Development of Construction Materials Science / E.V. Korolev // Architecture and Construction of Russia. – 2020. – № 3. – P. 143.
5. Budylyna, E.A. Systems Approach and Development Laws: Synthesis of Composites / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – №3 (60). – P. 19–25.
6. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P. 25–32.
7. Budylyna, E.A. Formation of composite properties: from an empirical approach to fundamentalization / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – № 1 (58). – P. 33–39.
8. Budylyna, E.A. Identification and modern paradigms in materials science / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – № 4 (61). – P. 24–28.

УДК 691.311

DOI 10.54734/20722958_2025_2_46

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

Россия, 308012, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46

Алфимова Наталия Ивановна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры строительного материаловедения,
изделий и конструкций
E-mail: alfimovan@mail.ru,

*Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет*

Россия, 308015, г. Белгород,
ул. Победы, 85

Пириева Севда Юнисовна,
кандидат технических наук, младший
научный сотрудник лаборатории
перспективных материалов и технологий,
старший преподаватель кафедры
экспертизы и управления недвижимостью
Белгородского государственного
технологического университета
им. В.Г. Шухова
E-mail: p-sevda@mail.ru

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

Russia, 308012, 308012, Belgorod, 46,
Kostyukova St.

Alfimova Natalya Ivanovna,
Candidate of Sciences, Assistant Professor of
the Department «Building Materials,
Products And Designs»
E-mail: alfimovan@mail.ru

Belgorod National Research University

Russia, 308015, Belgorod, 85, Pobedy St.

Pirievala Sevda Yunisovna,
Candidate of Sciences, Junior research
associate Laboratory of Advanced Materials
and Technologies, Senior lecturer at the
Department of Expertise and Real Estate
Management. Belgorod State Technological
University named after V.G. Shukhov
E-mail: p-sevda@mail.ru

Статья подготовлена по результатам выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей, в рамках национального проекта «Наука и университеты», по научной теме «Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки» (FZWG-2024-0001), с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ТВЕРДЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева

Один из принципов «зеленого строительства» базируется на создании комфортной среды для человека, обеспечить это можно за счет применения экологичных строительных материалов, например изделий на основе гипсовых вяжущих. В отличие от портландцемента производство гипсовых вяжущих не сопровождается выбросами углекислого газа в окружающую среду, помимо всего прочего при отсутствии в регионе природной сырьевой базы в качестве альтернативы могут выступать гипсосодержащие отходы различных производств, объемы которых по всему миру огромны. Так как одним из недостатков изделий на основе гипсовых вяжущих является их невысокая водостойкость, которая может проявляться в том числе и на стадии хранения изделий на складах продукции, целью исследований явилось изучение влияния условий и длительности твердения на физико-механические характеристики (средняя плотность, предел прочности при сжатии, водопоглощение, коэффициент размягчения) изделий,

изготовленных методом полусухого прессования сырьевой смеси, состоящей из цитрогипса и вяжущего на его основе.

Ключевые слова: гипсосодержащие отходы, цитрогипс, водостойкость, гипсовые вяжущие, прессование

This work was realized under the support of the State Assignment for the creation of new laboratories in 2021, including under the guidance of young promising researchers of the national project "Science and Universities". The research title is "Elaboration and development of scientific and technological foundations for creating an integrated technology for processing gypsum-containing waste from various industrial enterprises and searching of new ways to use processed products", FZWG-2024-0001. Equipment from the High Technology Center at BSTU named after V. G. Shukhov was used

THE EFFECT OF HARDENING CONDITIONS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF GYPSUM-CONTAINING WASTE

N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva

One of the principles of «green construction» is based on creating a comfortable environment for people, this can be achieved through the use of environmentally friendly building materials, such as products based on gypsum binders. Unlike Portland cement, the production of gypsum binders does not emit carbon dioxide into the environment, and in addition, in the absence of a natural raw material base in the region, gypsum-containing waste from various industries, the volumes of which are huge around the world, can act as an alternative. Since one of the disadvantages of products based on gypsum binders is their low water resistance, which can appear at the stage of storing products in warehouses, the purpose of the research is to study the effect of the curing condition and duration on the physical and mechanical characteristics (average density, compressive strength, water absorption, softening coefficient) of products manufactured by the method of semi-dry pressing of a raw mix consisting of citrogypsum and a binder based on it.

Keywords: gypsum-containing waste, citrogypsum, water resistance, gypsum binders, pressing

Введение. В связи с интенсификацией строительства и, как следствие, растущей потребностью в строительных материалах мировой спрос на вяжущие вещества увеличивается. Портландцемент остается самым популярным среди всех видов вяжущих в строительстве. По данным НП «Союзцемент», в России в 2023 году производство цемента выросло на 3,6 % по сравнению с 2022 годом и составило 63 млн тонн [1]. Следует отметить, что производство портландцемента связано со значительными выбросами CO₂ в окружающую среду (около 0,94 тонны CO₂ на 1 тонну цемента), что составляет 7 % мировых выбросов CO₂ [2, 3]. В то же время комплексный глобальный курс на снижение выбросов парниковых газов на протяжении всего жизненного цикла (от добычи сырья, производства строительных материалов до эксплуатации) строительных объектов требует разработки новых подходов, направленных на решение этой проблемы [4, 5]. К числу таких решений относится использование связующих, производство и потребление которых более экологично [6, 7]. Одними из таких материалов являются гипсовые вяжущие и материалы.

Гипсовые вяжущие и изделия на их основе обладают рядом преимуществ, таких, как огнестойкость, звукоизоляционные способности, нетоксичность, простота производства, благодаря которым они широко востребованы на рынке строительных материалов [8, 9]. При отсутствии в регионе природной сырьевой базы в качестве альтернативы для производства гипсовых вяжущих могут выступать гипсосодержащие отходы различных промышленных предприятий (фосфогипс, цитрогипс, борогипс, FGD-гипс и др.) [10–13]. Целесообразность и эффективность использования ГСО доказана многочисленными исследованиями, однако получаемое вяжущее не всегда бывает хорошего качества, что отражается на свойствах конечных изделий. Для решения проблемы, связанной с повышением качества вяжущего и изделий на основе гипсосодержащих отходов, применяют различные химические и механические мето-

ды, в частности полусухое прессование [14–16]. Ранее была доказана возможность получения изделий методом полусухого прессования сырьевой смеси, состоящей из цитрогипса и цитрогипсового вяжущего, с достаточно хорошими физико-механическими характеристиками: пределом прочности при сжатии 9–28,8 МПа, водопоглощением по массе 11,5–18,7 %, коэффициентом размягчения 0,3–0,6 и высоким качеством поверхности [14, 16].

Исходя из того что гипсовые вяжущие и, как следствие, изделия на их основе отличаются низкими показателями водостойкости, целью данной работы являлось изучение влияния условий и длительности твердения на физико-механические характеристики (средняя плотность, предел прочности при сжатии, водопоглощение, коэффициент размягчения) изделий, изготовленных методом полусухого прессования сырьевой смеси, состоящей из цитрогипса и вяжущего на его основе.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выступал отход биохимического синтеза лимонной кислоты – цитрогипс (Белгород, РФ).

Образцы изготавливались прессованием сырьевой смеси, состоящей из цитрогипсового вяжущего (ЦГВ) и фракционированного цитрогипса (ФЦГ). Основные характеристики компонентов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Качественные характеристики компонентов сырьевой смеси

Параметр	Значение
<i>Цитрогипсовое вяжущее</i>	
Марка по прочности	Г-3
Удельная поверхность	$\approx 300 \text{ м}^2/\text{кг}$
Насыпная плотность	690 кг/м^3
Нормальная густота	70 %
По срокам схватывания	Нормального твердения
По степени помола	Среднего помола
<i>Фракционированный цитрогипс</i>	
Размер фракции	$< 0,112 \text{ мм}$
Удельная поверхность	$\approx 400 \text{ м}^2/\text{кг}$
Насыпная плотность	490 кг/м^3

Также в состав сырьевой смеси с повышенным содержанием цитрогипсового вяжущего (табл. 2, 3) вводился пенообразователь (ПО) «Пеностром» (ТУ 2481-001-22299560-99).

Изготовление образцов осуществлялось путем прессования сырьевой смеси при заданных давлениях, процесс описан в [10]. На выходе получались образцы-цилиндры высотой 30–33 мм и диаметром 31 мм.

После формования с целью изучения влияния неблагоприятных условий (повышенная влажность) на процессы твердения изделий часть образцов хранилась в течение 30 сут в камере нормального твердения и влажного хранения образцов (КНТ) в воздушно-влажностных условиях. Контрольная серия образцов твердела в лаборатории в воздушно-сухих условиях (температура $(19 \pm 1)^\circ\text{C}$ и влажность $(31 \pm 1)\%$) в течение 2 сут до достижения ими равновесной влажности и 30 сут – для проведения сравнительного контроля в одном временном интервале.

Для образцов, твердевших в камере нормального твердения при повышенной влажности, кроме средней плотности и прочности на сжатие также определялись показатели водопоглощения и коэффициент размягчения. Средняя плотность и прочность на сжатие были определены для образцов через 2 ч после формования.

Микроструктуру и морфологию новообразований изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira 3 FesSem (Tescan, Чехия).

Прочностные характеристики определяли на образцах-цилиндрах в соответствии со стандартными методами испытаний. Использовалось прессовое оборудование:

лабораторный пресс усилием 10 тонн с диапазоном измерений 0–100 кН (градация 1 кН). Средняя скорость увеличения нагрузки в ходе испытания составила $(1,0 \pm 0,5)$ МПа/с.

Результаты и обсуждения. Рецептурно-технологические параметры исследуемых образцов, представлены в табл. 2.

Выбор рецептурно-технологических параметров каждого из 4 составов был продиктован следующими факторами:

- состав № 1 – минимальные материально-технические затраты (расход вяжущего, давление прессования);
- состав № 2 – оптимальный с позиции материально-энергетических затрат и физико-механических характеристик;
- состав № 3 – максимальные материально-технические затраты (расход вяжущего, использование максимальной дозировки пенообразователя, максимального давления прессования);
- состав № 4 – необходимость изучения влияния пенообразователя на физико-механические характеристики образцов в разные временные интервалы и в разных условиях твердения.

Т а б л и ц а 2

Рецептурно-технологические параметры исследуемых образцов

Состав	Количество ФЦГ, %	Количество пенообразователя, % от массы смеси	В/Т	Давление прессования, МПа
№ 1	50	0	0,225	2
№ 2	30	0		3,5
№ 3	10	0,19		4,5
№ 4	10	0		

Решение использовать пенообразователь только для состава с 10 %-м содержанием ФЦГ в смеси было продиктовано ранее полученными закономерностями, согласно которым положительное действие пенообразователя в большей степени проявляется при повышенных содержаниях ЦГВ в смеси [16].

Выбор верхнего предела прессования (4,5 МПа) был обусловлен тем фактом, что при данном давлении достигаются максимальные значения предела прочности при сжатии, а дальнейшее увеличение давления не вносит существенного вклада в повышение физико-механических характеристик изделий или даже приводит к их снижению.

Анализ полученных результатов позволил выявить следующие закономерности. В частности, при равных значениях средней плотности образцы, изготовленные с использованием 0,19 % ПО (см. табл. 3, состав № 3), в возрасте 2 ч отличаются меньшими значениями предела прочности при сжатии по сравнению с образцами, изготовленными без ПО (см. табл. 3, состав № 4), однако к 2 сут прочность на сжатие образцов с добавкой пенообразователя сравнивается с показателями бездобавочных образцов. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что пенообразователь замедляет процессы гидратации цитрогипсового вяжущего на начальной стадии твердения.

Также было установлено, что предел прочности при сжатии образцов, вне зависимости от состава, к 2 сут значительно увеличивается. Так, у образцов с 50 %-м содержанием ФЦГ (см. табл. 3, состав № 1) прочность на сжатие возросла в 2,6 раза; с 30 %-м содержанием ФЦГ (см. табл. 3, состав № 2) – в 2,3 раза; с 10 %-м содержанием ФЦГ – в 2,8 раза (см. табл. 3, состав № 3) и в 2 раза (табл. 3, состав № 4) по отношению к значениям образцов того же состава в двухчасовом возрасте. Также во всех случаях наблюдается снижение средней плотности образцов, что объясняется удалением влаги в результате их хранения в лабораторных условиях.

Т а б л и ц а 3

Физико-механические характеристики образцов
в зависимости от длительности и условий твердения

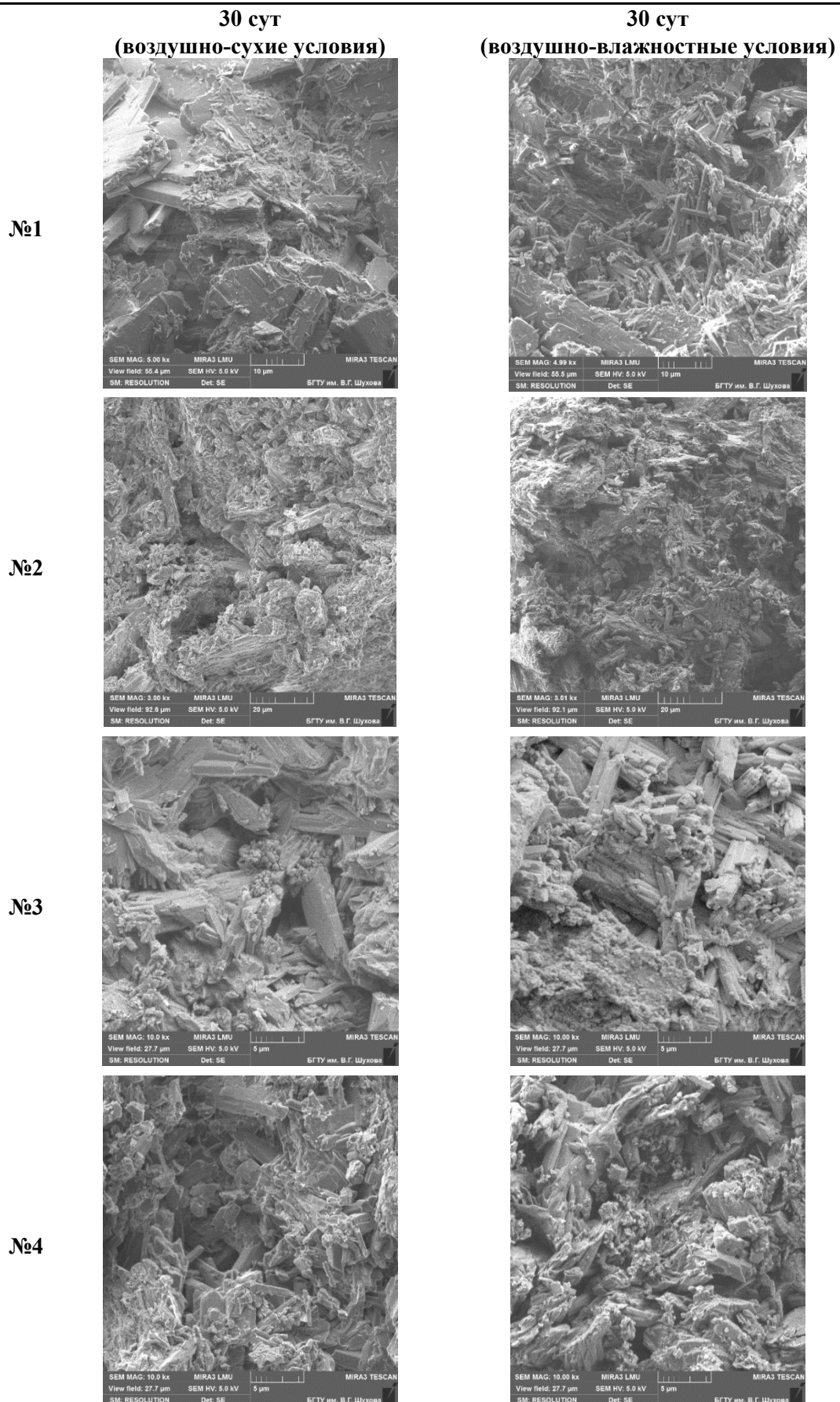
Параметр	Время, условия	Состав (см. табл. 1)			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Средняя плотность, кг/м ³	2 ч воздушно-сухие условия	1700	1804	1840	1839
Предел прочности при сжатии, МПа		3,67	10,20	10,51	14,33
Средняя плотность, кг/м ³	2 сут воздушно-сухие условия	1517	1637	1744	1724
Предел прочности при сжатии, МПа		9,9	23,3	29,8	28,8
Средняя плотность, кг/м ³	30 сут воздушно-сухие условия	1520	1635	1741	1726
Предел прочности при сжатии, МПа		10,1	24,0	29,5	28,7
Средняя плотность, кг/м ³	3 сут воздушно- влажностные	1558	1670	1765	1745
Предел прочности при сжатии, МПа		8,39	18,53	22,69	20,45
Водопоглощение по массе, %		16,1	14,0	9,4	11,2
Коэффициент размягчения		0,5	0,52	0,63	0,60

Снижение прочности образцов, твердевших в воздушно-влажностных условиях, вероятнее всего, связано с перекристаллизацией новообразований, приводящей к уплотнению структуры. Для подтверждения сделанного предположения было проведено сопоставление фотографий микроструктуры образцов, твердевших 30 сут в воздушно-сухих условиях лаборатории и 30 сут в КНТ (см. рисунок).

Из представленных фотографий видно, что размер, форма и плотность кристаллов меняются в зависимости от условий твердения. Так, микроструктура образцов с 50- и 30 %-м содержанием фракционированного цитрогипса в смеси, твердевших 30 сут в воздушно-влажностных условиях, представлена более крупными кристаллами по сравнению с образцами того же состава, но твердевшими 2 суток в воздушно-сухих условиях. В то же время микроструктура образцов с 10 %-м содержанием ФЦГ в системе, твердевших 2 сут в воздушно-влажностных условиях, представлена в основном призматическими кристаллами, в то время как на фотографиях микроструктуры образцов, твердевших 30 сут в КНТ, на фоне призматических кристаллов присутствуют мелкие хлопьеобразные новообразования.

Несмотря на сброс прочности, коэффициент размягчения всех образцов лежит в пределах значений, ранее полученных для контрольной серии, изготовленной без введения в состав сырьевой смеси ФЦГ (см. табл. 3), – 0,5–0,63.

Также необходимо отметить, что введение в состав сырьевой смеси пенообразователя снижает негативное воздействие повышенной влажности окружающей среды на твердение образцов с 10 %-м содержанием ФЦГ в составе сырьевой смеси, что выражается в меньшем сбросе прочности на сжатие, меньших значениях водопоглощения по массе, большем значении коэффициента размягчения по отношению к образцам без пенообразователя.



Микроструктура образцов в зависимости от условий и времени твердения
(нумерацию образцов см. табл. 2)

Выявленное положительное влияние пенообразователя в данном случае, вероятнее всего, связано со снижением эффекта Ребендера (расклинивающее действие воды при проникновении в межкристаллические полости). Пенообразователь, содержащий в своем составе ПАВ, снижает поверхностное натяжение воды, замедляя тем самым процесс ее проникновения в капиллярную структуру гипсового камня, что и предопределяет более низкие значения водопоглощения и более высокие коэффициента размягчения образцов, изготовленных из смеси с ПО (см. табл. 3, состав № 3) по отношению к значениям образцов, изготовленных из смеси без ПО (см. табл. 3, состав № 4).

Вывод. Таким образом, хранение образцов в воздушно-влажностных условиях отрицательно сказывается на пределе прочности при сжатии, и тем сильнее это влияние, чем больше в составе смеси цитрогипсового вяжущего. Также необходимо отметить, что при повышенном содержании цитрогипсового вяжущего в смеси (более 80 %) рекомендуется вводить в состав формовочной массы пенообразователь, который будет обеспечивать получение изделий с высоким качеством поверхности, а также, в случае нарушения условий хранения, снижать негативное воздействие неблагоприятных условий твердения.

Список литературы

1. <https://erzrf.ru/news/rost-potrebleniya-tsementa-v-rossii-prodolzhayetsya-uzhe-13-mesyatsev-podryad?tag>
2. Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector / Supriya, R. Chaudhury, U. Sharma [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137466 // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 417. – 137466.
3. Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies / S.A. Miller, G. Habert, R.J. Myers [et al.]. – DOI: 10.1016/j.oneear.2021.09.011 // One Earth. – 2021. – Vol. 4(10). – Pp. 1398–1411.
4. Lippiatt, N. Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective / N. Lippiatt, T.-C. Ling, S.-Y. Pan. – DOI: 10.1016/j.job.2019.101062 // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 28. – 101062.
5. Izumi, Y. Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry / Y. Izumi, A. Iizuka, H.-J. Ho. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127618 // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 312. – 127618.
6. Mechanical and thermophysical characterization of gypsum composites reinforced by different wastes for green building applications / S. Balti, A. Boudenne, L. Dammak [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130840 // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 372. – 130840.
7. The Correlation of Temperature-Mineral Phase Transformation as a Controlling Factor of Thermal and Mechanical Performance of Fly Ash-Based Alkali-Activated Binders / N.I. Kozhukhova, M.I. Kozhukhova, I.V. Zhernovskaya [et al.]. – DOI: 10.3390/ma14216677 // Materials. – 2020. – Vol. 13. – 5181.
8. Study on retarding feature and retardation mechanism of various retarding materials on gypsum as a construction material: A review / X. Ding, H. Wen, L. Yi [et al.]. – DOI: 10.1016/j.job.2023.106569 // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 72. – 106569.
9. Rashad, A.M. Phosphogypsum as a construction material / A.M. Rashad. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049 // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743.
10. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, М.Ю. Елистраткин [и др.]. – DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 11. – С. 8–23.
11. Physical, Mechanical and Microstructural Characteristics of Perlite-Based Geopolymers Modified with Mineral / N.I. Kozhukhova, R.A. Glazkov, M.S. Ageeva [et al.]. – DOI 10.3390/jcs806021 // Journal of Composites Science. – 2024. – Vol. 8 (6). – 211.

12. Левицкая, К.М. Использование фосфогипса как сырья для производства однокомпонентных вяжущих / К.М. Левицкая, Н.И. Алфимова, А.Ф. Бурьянов. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1(58). – С. 82–98.
13. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction / B.R.S. Calderón-Morales, A. García-Martínez, P. Pineda [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102506 // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 44. – 102506.
14. Алфимова, Н.И. Повышение качественных характеристик прессованных изделий из цитрогипса и вяжущего на его основе. – DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94 / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, К.М. Левицкая // Строительные материалы. – 2023. – № 5. – С. 89–94.
15. Faience waste for the production of wall / K. Petropavlovskii, T. Novichenkova, V. Petropavlovskaya [et al.]. – DOI: 10.3390/ma14216677 // Materials. – 2021. – 14(21). – 6677.
16. The Production of Gypsum Materials with Recycled Citrogypsum Using Semi-Dry Pressing Technology / N. Alfimova, S. Pirieva, K. Levickaya. – DOI: 10.3390/recycling8020034 // Recycling. – 2023. – Vol. 8 (2). – 34.

References

1. <https://erzrf.ru/news/rost-potrebleniya-tsementa-v-rossii-prodolzhayetsya-uzhe-13-mesyatsev-podryad?tag>
2. Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector / Supriya, R. Chaudhury, U. Sharma [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137466 // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 417. – 137466.
3. Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies / S.A. Miller, G. Habert, R.J. Myers [et al.]. – DOI: 10.1016/j.oneear.2021.09.011 // One Earth. – 2021. – Vol. 4(10). – Pp. 1398–1411.
4. Lippiatt, N. Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective / N. Lippiatt, T.-C. Ling, S.-Y. Pan. – DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101062 // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 28. – 101062.
5. Izumi, Y. Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry / Y. Izumi, A. Iizuka, H.-J. Ho. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127618 // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 312. – 127618.
6. Mechanical and thermophysical characterization of gypsum composites reinforced by different wastes for green building applications / S. Balti, A. Boudenne, L. Dammak [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130840 // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 372. – 130840.
7. The Correlation of Temperature-Mineral Phase Transformation as a Controlling Factor of Thermal and Mechanical Performance of Fly Ash-Based Alkali-Activated Binders / N.I. Kozhukhova, M.I. Kozhukhova, I.V. Zhernovskaya [et al.]. – DOI: 10.3390/ma14216677 // Materials. – 2020. – Vol. 13. – 5181.
8. Study on retarding feature and retardation mechanism of various retarding materials on gypsum as a construction material: A review / X. Ding, H.Wen, L. Yi [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106569 // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 72. – 106569.
9. Rashad, A.M. Phosphogypsum as a construction material / A.M. Rashad. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049 // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743.
10. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, M.Yu. Elistratkin [et al.]. – DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23 // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2020. – No.11. – P. 8–23.

11. Physical, Mechanical and Microstructural Characteristics of Perlite-Based Geopolymers Modified with Mineral / N.I. Kozhukhova, R.A. Glazkov, M.S. Ageeva [et al.]. – DOI 10.3390/jcs806021 // Journal of Composites Science. – 2024. – Vol. 8 (6). – 211.
12. Levickaya, K.M. Use of phosphogypsum as a raw material for the production of one-component binders / K.M. Levickaya, N.I. Alfimova, A.F. Buryanov. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82//Regional architecture and engineering. – 2024. – No. 1(58). – P. 82–98.
13. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction / B.R.S. Calderón-Morales, A. García-Martínez, P. Pineda [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102506 // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 44. – 102506.
14. Alfimova, N.I. Improvement in qualitative characteristics of pressed products from citrogypsum and based binder / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, K.M. Levickaya. – DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94 (rus) // Construction Materials. – 2023. – No. 5. – P. 89–94.
15. Faience waste for the production of wall / K. Petropavlovskii, T. Novichenkova, V. Petropavlovskaya [et al.]. – DOI: 10.3390/ma14216677 // Materials. – 2021. – 14(21). – 6677.
16. The Production of Gypsum Materials with Recycled Citrogypsum Using Semi-Dry Pressing Technology / N. Alfimova, S. Pirieva, K. Levickaya. – DOI: 10.3390/recycling8020034 // Recycling. – 2023. – Vol. 8 (2). – 34.

УДК 691:519.7: 001.8

DOI 10.54734/20722958_2025_2_55

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,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
главный редактор РИО
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,
Head 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, editor-in-chief of the
editorial and publishing department
E-mail: fmatem@pguas.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК СИСТЕМ

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

Разработаны методологические принципы анализа и синтеза композиционных материалов как систем. Проанализированы подходы к их декомпозиции (с возможностью агрегирования системы по подсистемам). Приведен опыт структурной и параметрической оптимизации композиционного материала как многомерной, многосвязной системы. Предложены методы ранжирования критериев качества.

Ключевые слова: композиционные материалы, сложные системы, структура, свойства, синтез, системный подход, идентификация, декомпозиция, агрегирование, управление, оптимизация

MODERN APPROACHES TO DESIGNING COMPOSITIONAL MATERIALS

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

Methodological principles of analysis and synthesis of composite materials as systems are developed. Approaches to their decomposition are analyzed (with the possibility of aggregating the system by subsystems). Experience of structural and parametric optimization of composite material as a multidimensional, multi-connected system is given. Methods for ranking quality criteria are proposed.

Keywords: composite materials, complex systems, structure, properties, synthesis, system approach, identification, decomposition, aggregation, control, optimization

Эффективность математического моделирования сложных систем определяется возможностью получения чёткого представления о моделируемом объекте с возможностью уточнения содержательной модели. Для одного и того же объекта возможно

построение нескольких специализированных моделей с акцентом на определённые стороны исследуемого объекта, характеризующие его с разной степенью детализации. Модельные эксперименты производятся при некоторых изменениях условий функционирования модели при систематизации данных о её поведении. Важнейшую роль играет перенос знаний с модели на оригинал: знания о модели корректируются с учётом тех свойств объекта-оригинала, которые не нашли отражения или были изменены при построении модели. Построение обобщенной модели объекта, преобразование объекта или управление им осуществляются по результатам практической проверки получаемых с помощью моделей знаний.

Композиционные материалы как системы. Композиционные материалы – это искусственно созданные неоднородные сплошные материалы, состоящие из двух или более компонентов с чёткой границей раздела между ними. Они рассматриваются как многокомпонентные системы, состоят из пластичной матрицы (связующего), выступающей основанием, и разнородных наполнителей, улучшающих характеристики материала; наполнители равномерно распределяются в связующем; четко сохраняется граница раздела компонентов (работают синергетически; свойства композита количественно и качественно отличаются от характеристик каждого из его составляющих, включают параметры, которыми изолированные компоненты не обладают) [1–3]. Связующее придает изделию необходимую форму и однородность; от его характеристик зависят технологические режимы получения композитов и их эксплуатационные качества (прочностные показатели, плотность, рабочие температуры, сопротивление разрушению и влиянию внешней среды). Наполнители вводят для увеличения прочностных показателей, жесткости, гибкости и эластичности; позволяют менять показатели изделия. Вариация состава матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентация наполнителя позволяют получить широкий спектр материалов с требуемым набором свойств. Армирование волокнами придает материалу анизотропию свойств (различие свойств в разных направлениях).

Декомпозиция. Она позволяет рассматривать любую исследуемую систему как сложную, состоящую из отдельных взаимосвязанных подсистем, которые, в свою очередь, могут быть расчленены на части [4, 5]. При декомпозиции каждое расчленение образует свой уровень: исходная система располагается на нулевом уровне; после её расчленения получают подсистемы первого уровня. Расчленение этих подсистем или некоторых из них приводит к появлению подсистем второго уровня и т. д. Упрощённое графическое представление декомпозированной системы дает её иерархическую структуру. Заметим, *система расчленяется только по одному, постоянному для всех уровней признаку*. В качестве признака декомпозиции могут быть: функциональное назначение частей, конструктивное устройство (вид материалов, формы поверхностей и др.), структурные признаки (вид схемы, способы и т.д.), виды этапов и процессов (жизненный цикл, физическое состояние и др.), предметные характеристики (экономические, информационные, технологические и др.) и др. Вычленяемые подсистемы в сумме должны полностью характеризовать систему и при этом взаимно исключать друг друга. В процессе проектирования декомпозиция неразрывно связана с последующей композицией, то есть с *агрегированием и увязкой отдельных частей (подсистем) в единую систему* (проверка на реализуемость в целом, совместимость и согласованность параметров).

Структурная оптимизация. Структурная оптимизация [6–9] состоит в определении способа соединения элементов в систему, которая сможет стать максимально эффективной с точки зрения заранее поставленной практической цели при заданных и ограниченных ресурсах. Оптимальность структуры в контексте строительства и инженерии означает нахождение той конструкции или композиции материала, которая обеспечивает наилучшее соотношение между различными критериями или ограничениями. Она проводится с целью минимизации затрат, максимизации прочности, устойчивости, снижения веса конструкции, улучшения эффективности использования материалов и ресурсов, повышения долговечности и т.д.; включает выбор оптимальной формы, размеров, материалов и расположения элементов конструкции. Процесс

оптимизации структуры производится на основе математического моделирования с выбором оптимального решения из множества альтернатив (методы линейного и нелинейного программирования, генетические алгоритмы, методы симуляции и др.). Каждый из методов имеет свои особенности и способы применения в различных задачах оптимизации. После выбора метода оптимизации производятся инженерные расчеты для оценки оптимального решения с учетом всех необходимых технических и экономических аспектов. Это позволяет проверять соответствие найденного варианта требованиям проекта. После завершения процесса оптимизации выбирается наилучший вариант структуры, который соответствует поставленным целям и критериям оптимизации (компромисс между различными параметрами и требованиями проекта). Оптимизация структуры позволяет создавать эффективные и экономичные конструкции, способные выдерживать нагрузки в условиях реальной эксплуатации.

Важно найти связь между устойчивостью всей системы и устойчивостью всех ее отдельных составных частей (подсистем). Эта связь определяется следующим образом: во всякий момент устойчивость всей системы зависит от наименее сопротивляющихся входящих подсистем или наиболее слабых мест в системе (структурная устойчивость определяется наименьшей его частичной устойчивостью: где тонко, там и рвется).

Параметрическая оптимизация. При синтезе композитов как систем почти всегда постулируется существование математической модели, позволяющей заменить в необходимых случаях объект идентификации (*при многих уровнях в иерархической структуре материала ее получение практически не достижимо*). Одно из главных требований к моделям – простота интерпретаций физического смысла входящих в модели коэффициентов. Выбор характеристик объекта-оригинала, которые сохраняются и войдут в модель, определяется целями моделирования. Существенные черты объекта или процесса в математической модели определяются на языке уравнений или других математических средств. При компьютерном моделировании анализ, интерпретация и сопоставление результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта (а при необходимости и последующее уточнение модели) производятся на основе серии вычислительных экспериментов.

В настоящее время используется некий симбиоз аналитических методов и компьютерного моделирования: моделирование отдельных свойств; выделение основных параметров моделей; зависимость параметров моделей от рецептурно-технологических характеристик; зависимость свойств от рецептурно-технологических параметров (метапараметров – функций параметров моделей); определение множества частных критериев; ранжирование свойств материалов; минимизация размерности критериального пространства; многокритериальная оптимизация качества материала и соответствующих оптимальных рецептурно-технологических параметров. Идентификация систем предполагает экспериментальное изучение и сопоставление входных и выходных процессов, а также выбор соответствующей математической модели. Модель должна быть такой, чтобы её реакция и реакция объекта на один и тот же входной сигнал были близкими.

Композиционный материал как многомерная и многосвязная система. Композиционный материал – многокомпонентный материал, изготовленный из компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами. В сочетании они приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов. С учетом многомерности и многосвязности материала как системы наиболее перспективным является использование при исследованиях методов системного анализа [2]. Связь частных критериев качества материала и рецептурно-технологических параметров, в частности, может быть получена с использованием методов планирования эксперимента (экспоненциально-полиномиально-тригонометрические модели).

При определении зависимости параметров моделей и свойств материала от рецептурно-технологических характеристик на каждом структурном уровне и для каждого из свойств материала могут использоваться различные модели. Как правило,

частные критерии качества (свойства) материала есть нелинейные функции рецептурно-технологических параметров (нормированных); линейные части являются основными составляющими; парные взаимодействия определяют синергетические составляющие (в ряде случаев могут превосходить линейные). Первоначально приоритеты критериев (являются не только противоречивыми, но и зависимыми) обычно устанавливаются на основе экспертных оценок. Их уточнение должно производиться с учетом корреляционных связей (коэффициентов корреляции) между некоторым обобщенным (глобальным) критерием и частными критериями (как правило, чем больше коэффициент корреляции, тем большим приоритетом обладает частный критерий). Для минимизации размерности критериального пространства может использоваться метод главных компонент.

Ранжирование критериев качества и оптимизация. Ранжирование критериев качества осуществляется методом анализа иерархий: проблему обозначают в виде иерархической структуры; указываются цель или проблема, а также параметры, определяющие итоговые критерии (парные сравнения критериев, получение матрицы приоритетов). Задачи однокритериальной оптимизации (с одним критерием оптимизации) иногда называют скалярными, а многокритериальной – векторной оптимизацией. Один из методов многомерной математической оптимизации – дифференциальная эволюция, предназначенная для нахождения глобального минимума (или максимума) недифференцируемых, нелинейных, мультимодальных (имеющих, возможно, большое число локальных экстремумов) функций от многих переменных. Векторная оптимизация заключается в поиске вектора целевых переменных, удовлетворяющего наложенным ограничениям и оптимизирующего векторную функцию, элементы которой соответствуют целевым функциям. Эти функции образуют математическое описание критерия удовлетворительности и, как правило, взаимно конфликтуют. Векторизация в параллельных вычислениях – это вид распараллеливания программы, при котором однопоточные приложения, выполняющие одну операцию в каждый момент времени, модифицируются для выполнения нескольких однотипных операций одновременно. Скалярные операции, обрабатывающие по паре операндов, заменяются на операции над массивами (векторами), обрабатывающие несколько элементов вектора в каждый момент времени.

Выводы. Разработаны методологические принципы идентификации, управления и синтеза композиционных материалов как многомерных и многосвязных систем.

Показаны эффективность математического моделирования сложных систем с четким представлением о моделируемом объекте (композиционном материале); возможность построения нескольких специализированных моделей с акцентом на определенные стороны исследуемого объекта, характеризующие его с разной степенью детализации для одной и той же системы.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Архитектура и строительство России. – 2020. – № 3. – С. 143.
2. Королев, Е.В. Системный анализ эволюции знаний о структурообразовании строительных материалов / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Данилов, А.М. Айзенштадт // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 9. – С. 18–27.
3. Будылина, Е.А. Идентификация и современные парадигмы в материаловедении / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 4 (61). – С. 24–28.
4. Будылина, Е.А. Системный подход и законы развития: синтез композитов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3 (60). – С. 19–25.
5. Королев, Е.В. Практические аспекты идентификации и управления при синтезе композитов / Е.В. Королев, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 24–32.

6. Королев, Е.В. Композиционные материалы как полидисперсные системы / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3 (48). – С. 16–25.
7. 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.
8. Чернышов, Е.М. Универсалии строительных композитов как структурированных твердых тел / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 11 (755). – С. 37–54.
9. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P. 25–32.

References

1. Korolev, E.V. Prospects for the Development of Construction Materials Science / E.V. Korolev // Architecture and Construction of Russia. – 2020. – № 3. – P. 143.
2. Korolev, E.V. Systems Analysis of the Evolution of Knowledge on the Structure Formation of Construction Materials / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Danilov, A.M. Aizenshtadt // Industrial and Civil Engineering. – 2024. – № 9. – P. 18–27.
3. Budylna, E.A. Identification and Modern Paradigms in Materials Science / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – №4 (61). – P. 24–28.
4. Budylna, E.A. Systems approach and laws of development: synthesis of composites / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and Engineering. – 2024. – №3 (60). – P. 19–25.
5. Korolev, E.V. Practical aspects of identification and management in the synthesis of composites / E.V. Korolev, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and Engineering. – 2022. – №2 (51). – P. 24–32.
6. Korolev, E.V. Composite materials as polydisperse systems / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Regional architecture and Engineering. – 2021. – №3 (48). – P. 16–25.
7. Chernyshov, E.M. The problem of complexity and consistency of qualitative description and statistical reliability of quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: theory and practice. – 2022. – №2 (17). – P. 75–80.
8. Chernyshov, E.M. Universals of building composites as structured solids / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // News of higher educational institutions. Construction. – 2021. – №11 (755). – P. 37–54.
9. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P. 25–32.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Лавров Иван Юрьевич,
аспирант, ассистент кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Beregovoy Vitaly Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Building Materials
and Woodworking Technology»

Lavrov Ivan Yurievich,
Postgraduate, Assistant Lecturer of the
Department «Building Materials and
Woodworking Technology»

Kapustin Andrej Egorovich,
Assistant lecturer of the Department «Building
Materials and Woodworking Technology»
E-mail: techbeton@pguas.ru

МИКРОСТРУКТУРА И ДЕМПФИРУЮЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, А. Е. Капустин

Исследовано влияние рецептурных и технологических факторов на формирование этtringитовой фазы в микроструктуре цементного камня мелкозернистого бетона. Приведены результаты вибродинамических испытаний образцов бетонов с различным содержанием расширяющейся добавки на основе сульфoалюмината кальция. Показано позитивное влияние компенсаторов усадки на вибродемпфирующие и деформативные показатели гетерогенных цементных материалов.

Ключевые слова: микроструктура, этtringитовая фаза, вибродинамические показатели, мелкозернистые бетоны, демпфирование, расширяющаяся добавка

MICROSTRUCTURE AND DAMPING PARAMETERS OF FINE- GRAINED CONCRETE

V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov, A. E. Kapustin

The influence of prescription and technological factors on the formation of the ettringite phase in the microstructure of cement stone of fine-grained concrete is investigated. The results of vibrodynamic tests of concrete samples with different contents of an expansion additive based on calcium sulfoaluminate are presented. The positive effect of shrinkage compensators on vibration damping and deformation characteristics of heterogeneous cement materials is shown.

Keywords: microstructure, ettringite phase, vibration dynamics, fine-grained concrete, damping, expansion additive

В настоящее время существует потребность в создании и внедрении технологий, основанных на использовании высокопрочных цементных литевых композиций и позволяющих исключить горячие процессы (металлургия, сварка) из цикла возведения конструкций и создания элементов оборудования промышленного назначения [1, 2]. Развитие научных основ материаловедения и последние достижения в области химического модифицирования позволили получить новые виды конструкционных бетонов с уникальными технологическими и физико-механическими свойствами, среди которых заметно выделяются высокофункциональные самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны (ВФСУБ) [3, 4].

При проведении экспериментальной части использовались следующие компоненты: портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5 (C_3S – 67.3 %, C_2S – 11.9 %, C_3A – 6.7 %, C_4AF – 11.9 %); песок кварцевый Ртищевского месторождения (Саратовская обл.) $M_k=2.33$; заполнитель, полученный дроблением гранитного щебня М1400 фракции 1.25-2.5 мм; микрокремнезём конденсированный неуплотнённый МК-85 ($S_{уд}=21000 \text{ м}^2/\text{кг}$) [ПАО «НЛМК», РФ]; высокоактивный метакаолин ВМК-45 ($S_{уд}=1800 \text{ м}^2/\text{кг}$); кварцевая мука Silverbond 15 EW R300 ($S_{уд}=1100 \text{ м}^2/\text{кг}$) [Раменский ГОК]; микрокальцит ММ-315 ($S_{уд}=230 \text{ м}^2/\text{кг}$); компенсатор усадки на основе сульфоалюмината кальция Denka CSA20 [Degussa Construction Systems Co. (Япония)]; 2-бутоксизтанол (бутилцеллозольв) [КНР]; гиперпластификаторы на поликарбоксилатной основе (ГП) Sika ViscoCrete 226-P [Sika, РФ] (базовый вариант), Melflux 1641F, 2651F, 5581F производства BASF Construction Additives (Германия); PCE TR-6088 производства Taishan Tianrun Factory (КНР); PCE-801, 6035 производства Shanghai Bestsolution Co (КНР) (альтернативный вариант).

В цементном камне присутствуют составляющие, существенно влияющие на формирование структурно зависимых свойств: *кристаллический каркас*, сформированный гидросиликатами кальция, гидроксидом кальция, гидроалюминатами и гидроферритами кальция, а также их сульфатсодержащими фазами (эттрингит); *цементный* (тоберморитовый) *гель* на основе субмикрочастиц гидросиликатов кальция; *негидратированные частицы клинкера и поровое пространство*. Последнее подразделяется на гелевые (менее 5 нм), микрокапилляры (5... 100 нм) и макропоры (более 100 нм) [5]. В гелевых порах вода структурируется и меняет свои свойства под воздействием молекулярных поверхностных сил. Гидрофильность поверхности увеличивает количество активных центров адсорбции, определяющих силовое поле притяжения молекул H_2O , что способствует образованию плотного адсорбционного слоя ($\rho_{H_2O(адс.)} \rightarrow 1200 \text{ кг/м}^3$). По устоявшемуся мнению, вода в тонкопленочном состоянии обладает определенной ортотропностью: параллельно подложке ее свойства практически не изменяются, а в перпендикулярном направлении – приобретают свойства псевдотвёрдого тела (прочность на сдвиг порядка 100 кПа). Аномалия свойств адсорбированной воды способна повлиять на формирование свойств цементного композита, включая вибродинамические характеристики, за счет микроскопического проскальзывания твердых поверхностей в контактных зонах. Наличие ПАВ в воде затвердения изменяет характер адсорбции на минеральной подложке путём понижения величины поверхностного натяжения и поверхностной энергии частиц, являющейся движущей силой механизма капиллярного конденсирования. Это позволило обосновать применение бутилцеллозольв и гиперпластификаторов в рамках исследования влияния рецептурных факторов на структурно зависимые вибродинамические свойства.

Для материалов с жесткими структурными связями, к которым относится цементный камень, диссипация вибрационной нагрузки обеспечивается макроскопическим проскальзыванием констатирующих поверхностей. Под воздействием вибрации в гетерогенном материале возникают упругие волны различной частоты, а их распространение по объему вызывает процессы деструктивной интерференции, когда они перекрываются не по фазе. Результирующее взаимодействие характеризуется меньшей амплитудой и повышает тем самым способность системы к демпфированию. С учетом описанного выше механизма поглощения механического возмущения структурой цементного камня при проектировании рецептур целесообразно исходить из условия формирования в процессе гидратации соединений, существенно различающихся по плотности и геометрии.

В возрасте 28 суток затвердевший цемент содержит 50-60 % гидросиликатного геля от объема твердой фазы, 20-25 % $Ca(OH)_2$ и 15-20 % гидросульфоалюминатов (ферритов) кальция [6]. По своей сути, это композит на основе гелеобразной матрицы, дисперсно-армированной агрегированной кристаллической фазой и стохастически распределенными по объему микропорами. Наиболее массивными структурными составляющими являются негидратированные части клинкера и крупные кристаллы гидратов $Ca(OH)_2$ (до 15...25 мкм), эттрингита (5...80 мкм), микроразмерный напол-

нитель. С точки зрения формирования демпфирующих свойств наличие механически более податливой объединяющей фазы в виде гидросиликатного геля (C–S–H) позволяет рассматривать такие системы как своеобразный инерционный демпфер (рис. 1).

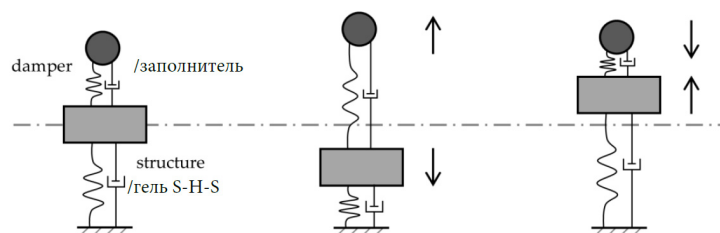


Рис. 1. Схема работы инерционного демпфера в структуре цементного камня

Согласно последним исследованиям, минимальные размеры структурных элементов твердой фазы гидросиликатного геля ограничены 4...6 нм [7]. При этом выделяют два типа геля: C–S–H высокой плотности с микропористостью около 24 % (C–S–H_{вп}) и C–S–H низкой плотности с пористостью около 36 % (C–S–H_{нп}), которые относят к внутреннему продукту и внешнему продукту гидратации соответственно.

В отличие от C–S–H кристаллы этtringита ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) имеют игольчатую или призматическую форму и синтезируются вблизи поверхности C_3A . Их средний размер колеблется в диапазоне 5...80 мкм и зависит от условий процесса гидратации. Так, вводя в состав бетона гидравлические добавки и понижая тем самым концентрацию $\text{Ca}(\text{OH})_2$, можно трансформировать гидросульфатоалюминаты кальция с трехсульфатной в моносульфатную форму ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), что позволит увеличить их плотность (с 1730 до 1950 кг/м³).

Влияние минерально-фазового состава на вибродинамические показатели бетонов исследовали на примере этtringитовой фазы. Такой подход продиктован проблемой усадочных деформаций бетонов, актуальной для высокопрочных составов с повышенным расходом цемента. Известный способ снижения усадки основан на формировании развитой этtringитовой фазы в структуре твердеющего цемента [8]. Это объясняется особенностью процесса образования кристаллов этtringита, способствующего их прорастанию в свободном поровом пространстве цементного камня и препятствующего распространению усадочных трещин. В работе [9] показано, что наличие равномерно распределенных и относительно крупных кристаллогидратов увеличивает прочность затвердевшего бетона на изгиб.

При проведении исследований в качестве сульфатосодержащей добавки применяли Denka CSA, специально разработанную для обеспечения стабильности размеров конструкции в период твердения и физически компенсирующую усадочные напряжения. Указанная добавка способствует образованию игольчатых кристаллов этtringита за счет присоединения химически связанной воды и уменьшает экзотермию процесса гидратации цемента, что актуально в аспекте предотвращения термических деформаций в конструкциях из свежееуложенного бетона [10].

Результаты исследований влияния микрокремнезёма, сульфатосодержащей расширяющейся добавки (САК) и гиперпластификаторов на параметры микроструктуры цементного камня приведены в ряде современных работ. Информативные данные получены в РХТУ имени Д.И. Менделеева для карбоксилатного гиперпластификатора Melflux 1641F (ГП) [11]. Установлено, что в рассматриваемой рецептурной системе морфологии этtringита и тоберморитового геля существенно различаются: в отсутствие МК-85 этtringит беспорядочно прорастает в поры твердеющего цемента, а портландит имеет вид крупных пластинок (рис. 2, а); добавка МК-85 способствует формированию крупных гелеобразных соединений (C–S–H), а также пластинок гидроалюминатов кальция при подавлении роста этtringитовой фазы (рис. 2, а); добавка САК активизирует процесс синтеза нитевидных и столбчатых кристаллов этtringита в свободных промежутках между другими новообразованиями (рис. 2, в).

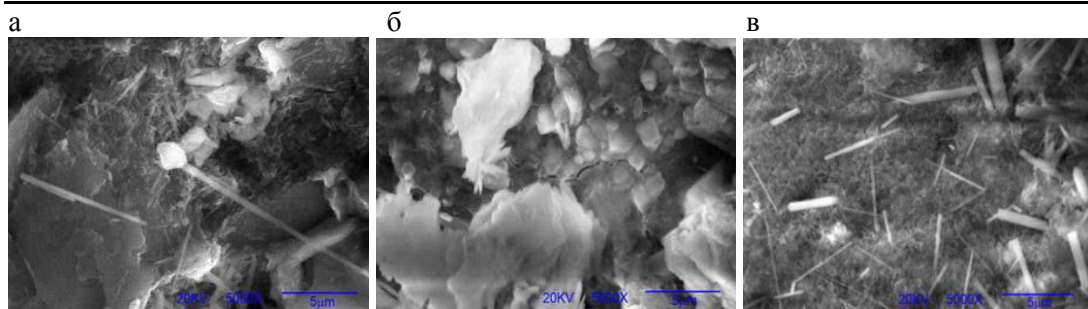


Рис. 2. Микрофотографии цементного камня:
а – без добавок; б – с добавкой МК-85; в – с добавкой МК-85 и САК [6]

Результаты физико-химических исследований с применением методов РФА и ДТА показали, что главными кристаллическими фазами являются негидратированный цемент, портландит и этtringит. На рентгенограмме портландцемента с расширяющейся добавкой закономерно установлено увеличение дифракционных пиков этtringита. Изучение образцов с применением ДТА обнаружило эндоэффекты в областях 90-140 и 450-500°C, которые также свидетельствуют о наличии гидросиликатов кальция и этtringита.

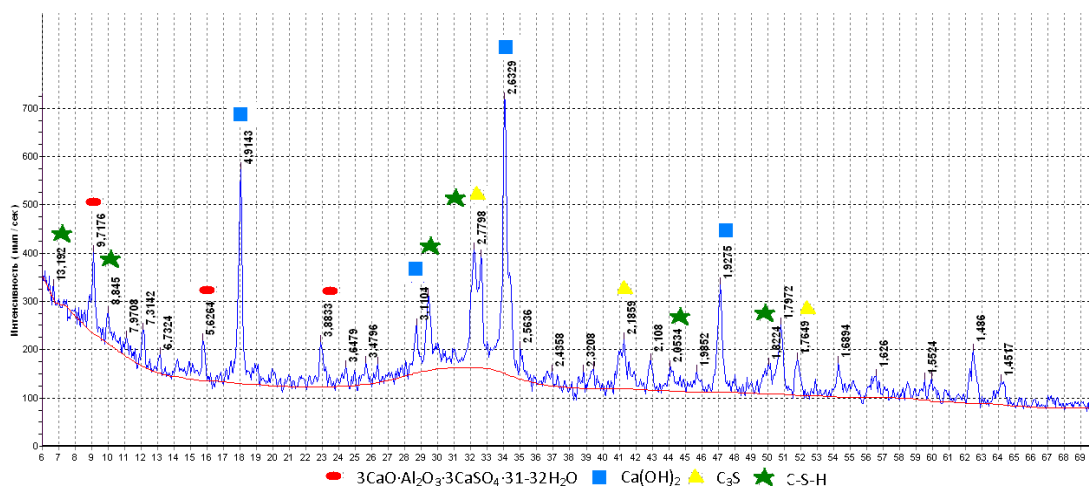


Рис. 3. РФА цементного камня с добавкой САК (5 %) после 28 суток твердения [6]

Результаты изучения индивидуального влияния гиперпластификаторов (без добавок САК и МК-85) на формирование этtringитовой фазы представлены в работах [12, 13]. Суммируя полученные данные, можно констатировать активизацию процесса образования этtringита при введении гиперпластификатора на поликарбоксилатной основе (на примере MasterGlenium ACE 430) с формированием продолговатых призматических кристаллов до 5 мкм. При этом наблюдались активное заполнение порового пространства и «залечивание» возникающих при перекристаллизации микротрещин и пор, что сопровождалось повышением плотности и прочности цементного камня.

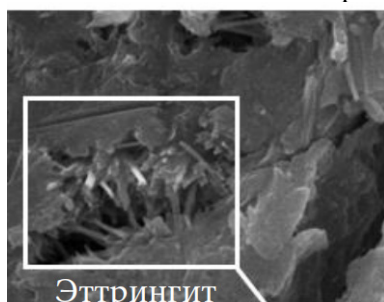


Рис. 4. Микроструктура цементного камня с ГП MasterGlenium ACE 430 (0,7 % ПЦ)

Таким образом, добавляя в рецептуру микрокремнезём и ГП, можно управлять процессами формирования минерально-фазового состава и морфологии продуктов гидратации C_3A в аспекте изучения вибродинамических показателей цементных бетонов.

Экспериментальные исследования вибродинамических свойств бетонов проводили на установке, разработанной и усовершенствованной с учетом особенностей, выявленных в ходе испытаний мезомodelей – образцов-балочек длиной 300 мм – гетерогенных строительных материалов. Последовательность этапов проведения вибродинамических испытаний показана на рис. 5. Установка обеспечивает выполнение экспериментов методами вынужденных и свободных колебаний, что дополняет функционал ее действия показателем вибростойкости [14–16]. По первому методу используется консольная схема закрепления образцов (рис. 6), а по второму – свободное расположение образца на узких опорах.

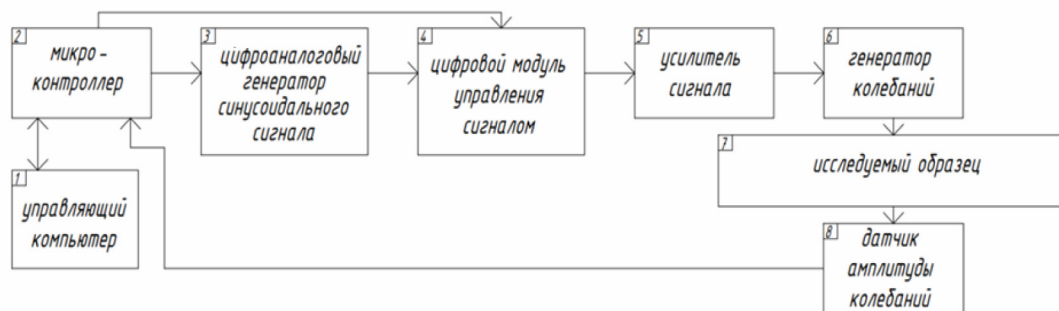


Рис. 5. Схема проведения испытаний

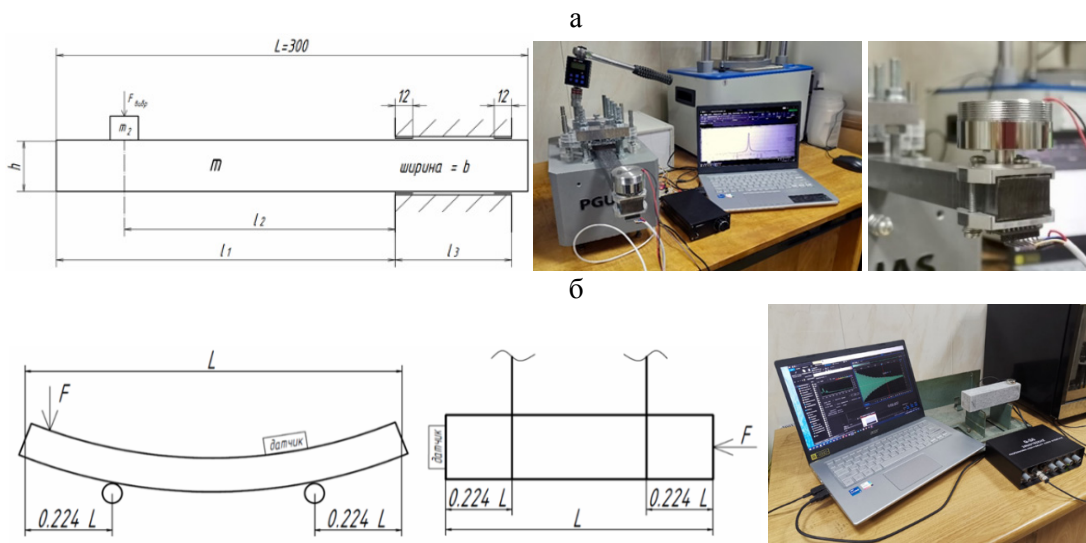


Рис. 6. Схемы закрепления образцов-балочек и общий вид установки для определения вибродинамических характеристик бетона:

а – консольное закрепление образцов; б – расположение образца на опорах

По результатам двухфакторного эксперимента установлено (рис. 7), что повышение дозировки расширяющей добавки (Denka CSA20) до 5, 10, 12, 15 % (от Ц) приводит к росту логарифмического декремента на 4.3, 8.7, 10.9, 17.4 % соответственно, а введение до 2 % бутилцеллозольвы – добавки, редуцирующей поверхностное натяжение внутрипоровой жидкости, – усиливает этот эффект в среднем на 4...5 % [14].

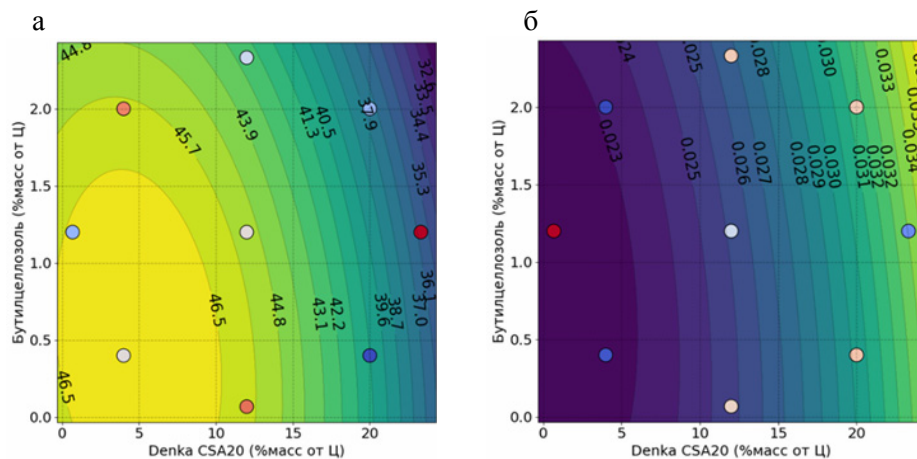


Рис. 7. Влияние добавок на вибродинамические свойства бетона:

а – динамический модуль упругости E_d , ГПа; б – логарифмический декремент затухания (δ)

Влияние удельного расхода ПЦ на вибродинамические показатели исследовали на образцах со следующими показателями: состав № 1 ($\rho = 300 \text{ кг/м}^3$; $R_{сж}^1 = 25.6 \text{ МПа}$; $R_{из}^1 = 4.37 \text{ МПа}$; $R_{сж}^{28} = 73.3 \text{ МПа}$; $R_{из}^{28} = 9.79 \text{ МПа}$); № 2 ($\rho = 517 \text{ кг/м}^3$; $R_{сж}^1 = 39.8 \text{ МПа}$; $R_{из}^1 = 6.63 \text{ МПа}$; $R_{сж}^{28} = 103.4 \text{ МПа}$; $R_{из}^{28} = 15.37 \text{ МПа}$); № 3 ($\rho = 734 \text{ кг/м}^3$; $R_{сж}^1 = 61.5 \text{ МПа}$; $R_{из}^1 = 8.25 \text{ МПа}$; $R_{сж}^{28} = 131.2 \text{ МПа}$; $R_{из}^{28} = 16.49 \text{ МПа}$).

Полученные данные (рис. 8) позволили установить рост величины δ в 1,22 раза при увеличении удельного расхода ПЦ с 300 до 734 кг/м^3 . Основная причина наблюдаемой зависимости обусловлена снижением объёмной доли кристаллических фаз вследствие замещения части мраморной муки ($\text{CaCO}_{3(\text{кр.ст.})}$) цементным камнем, включающим гелевые фазы (C–S–H). Сопутствующим фактором является повышение степени гетерогенности микроструктуры, затрудняющее процесс прохождения упругих волн посредством их отражения, преломления и переизлучения. Образующиеся при гидратации цемента разветвленные структуры формируют резонаторы, размерно-геометрические параметры которых, а также взаимное расположение в теле бетона носят преимущественно случайный характер. При их включении в работу (при наличии внешнего циклического воздействия) это приводит к взаимному наложению механических колебаний с эффектом деструктивной интерференции, поскольку переизлучаемые ими волны различаются по фазе, амплитуде и частоте.

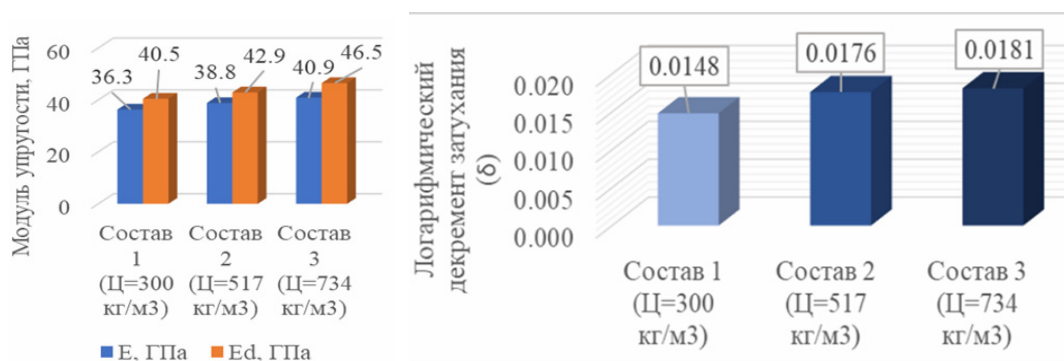


Рис. 8. Влияние удельного расхода ПЦ на вибродинамические показатели мелкозернистого бетона

Выводы. Установлено, что вибропоглощающие свойства бетонов регулируются изменением фазового состава цементного камня, достигаемым за счет увеличения

относительного содержания тоберморитового геля и кристаллов этtringита. Повышение дозировки сульфоалюминатной расширяющейся добавки (Denka CSA20) до 5, 10, 12, 15 % (от Ц) сопровождается ростом логарифмического декремента затухания бетона на 4.3, 8.7, 10.9, 17.4 % соответственно, а введение до 2 % бутилцеллозольва усиливает создаваемый эффект на 4...5 %.

Установлен рост величины логарифмического декремента затухания бетона в 1,22 раза при увеличении удельного расхода ПЦ с 300 до 734 кг/м³, что обусловлено общим снижением объёмной доли кристаллических фаз вследствие замещения части компонента (мраморной муки) цементным камнем, содержащим гелевые фазы (C–S–H).

Максимальное значение E_d наблюдается у составов с содержанием расширяющейся добавки 4...6 % при отсутствии модификатора поверхностного натяжения (бутилцеллозольва). Повышение расхода Denka CSA20 до 12 % сопровождается снижением E_d и ростом величины демпфирования, что свидетельствует о повышении структурной неоднородности цементного камня.

Список литературы

1. Möhring, H.-C. Materials in machine tool structures / H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, F. Bleicher // CIRP Annals. – 2015. – Vol. 64, № 2. – P. 725–748.
2. Береговой, В.А. Высокофункциональные бетоны в станкостроении: технологические аспекты применения / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 18–25.
3. Aïtcin, P.-C. Science and technology of concrete admixtures / P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead publishing, 2015. – 617 p.
4. Калашников, В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 4–6.
5. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – Москва : Стройиздат, 1979. – 344 с.
6. Кравченко, И.В. Химия и технология специальных цементов / И.В. Кравченко. – Москва : Стройиздат, 1979. – 207 с.
7. Tennis, P.D. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes / P.D. Tennis, H.M. Jennings // Cement and Concrete Research. – 2000. – Vol. 30, № 6. – P. 855–863.
8. Кузнецова, Т.В. Модифицирование портландцемента для устранения усадки бетона / Т.В. Кузнецова, Д.Я. Френкель, Ю.Р. Кривобородов // Цемент и его применение. – 2007. – № 4. – С. 54–55.
9. Самченко, С.В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов / С.В. Самченко. – Москва : РХТУ им.Д.И.Менделеева, 2005. – 154 с.
10. Denka Company Limited // Denka CSA-20: [сайт]. [2016]. – URL: <http://www.denka.co.jp/> (дата обращения 1.12.2024)
11. Еленова, А.А. Влияние гидродинамически активированной добавки кристаллогидрата на гидратацию и твердение цементного камня / А.А. Еленова, Ю.Р. Кривобородов // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. 30, № 7 (176). – С. 36–38.
12. Корчунов, И.В. Влияние эффективных водоредуцирующих добавок на свойства цемента / И.В. Корчунов, А.О. Торшин, С.Е. Курдюмова, Е.А. Дмитриева // Сухие строительные смеси // Сухие строительные смеси. – 2019. – № 5. – С. 30–34.
13. Kong, F.-R. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste / F.-R. Kong, L.-S. Pan, C.-M. Wang, D.-L. Zhang, N. Xu // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 105. – P. 545–553.
14. Лавров, И.Ю. Высокофункциональные бетоны для промышленного строительства и машиностроения / И.Ю. Лавров, В.А. Береговой // Строительные материалы. – 2024. – № 12. – С. 42–48.

15. Лавров, И.Ю. Лабораторный комплекс для исследования вибродинамических показателей конструкционных бетонов / И.Ю. Лавров, В.А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4(57). – С. 56–65.

16. Береговой, В.А. Опыт применения высокофункционального бетона в конструкции современного станка / В.А. Береговой, К.Н. Махамбетова, И.Ю. Лавров // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI Века. – 2023. – № 5 (280). – С. 31–37.

References

1. Möhring, H.-C. Materials in machine tool structures / H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, F. Bleicher // CIRP Annals. – 2015. – Vol. 64, № 2. – P. 725–748.

2. Beregovoy, V.A. Highly functional concretes in machine tool building: technological aspects of application / V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 18–25.

3. Aïtcin, P.-C.. Science and technology of concrete admixtures / P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead publishing, 2015. – 617 p.

4. Kalashnikov, V.I. Calculation of compositions of high-strength self-compacting concrete / V.I. Kalashnikov // Construction materials. – 2008. – No. 10. – P. 4–6.

5. Sheikin, A.E. Structure and Properties of Cement Concretes / A.E. Sheikin, Yu.V. Chekhovsky, M.I. Brusser. – Moscow : Stroyizdat, 1979. – 344 p.

6. Kravchenko, I.V. Chemistry and Technology of Special Cements / I.V. Kravchenko. – Moscow : Stroyizdat, 1979. – 207 p.

7. Tennis, P.D. A Model for Two Types of Calcium Silica Hydrate in the Microstructure of Portland Cement Pastes / P.D. Tennis, H.M. Jennings // Cement and Concrete Research. – 2000. – Vol. 30, No. 6. – P. 855–863.

8. Kuznetsova, T.V. Modification of Portland Cement to Eliminate Concrete Shrinkage / T.V. Kuznetsova, D.Ya. Frenkel, Yu.R. Krivoborodov // Cement and Its Application. – 2007. – No. 4. – P. 54–55.

9. Samchenko, S.V. The Role of Ettringite in the Formation and Genesis of the Structure of Special Cement Stone / S.V. Samchenko ; Mendelev University of Chemical Technology. – Moscow, 2005. – 154 p.

10. Denka Company Limited // Denka CSA-20: [сайт]. [2016]. – URL: <http://www.denka.co.jp> / (дата обращения 1.12.2024)

11. Yelenova A. A., Krivoborodov Yu. R. Effect of Hydrodynamically Activated Crystal Hydrate Additive on Hydration and Hardening of Cement Stone // Advances in Chemistry and Chemical Technology. – 2016. – Vol. 30, No. 7 (176). – P. 36–38.

12. Korchunov, I.V. Effect of effective water-reducing additives on the properties of cement / I.V. Korchunov, A.O. Torshin, S.E. Kurdyumova, E.A. Dmitrieva // Dry building mixes. – 2019. – No. 5. – P. 30–34.

13. Kong, F.-R. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste / F.-R. Kong, L.-S. Pan, C.-M. Wang, D.-L. Zhang, N. Xu // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 105. – P. 545–553.

14. Lavrov I.Yu., Beregovoy V.A. Highly functional concretes for industrial construction and mechanical engineering / I.Yu. Lavrov, V.A. Beregovoy // Construction materials. – 2024. – No. 12. – P. 42–48.

15. Lavrov, I.Yu. Laboratory complex for studying vibrodynamic indicators of structural concrete / I.Yu. Lavrov, V.A. Beregovoy // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 4(57). – P. 56–65.

16. Beregovoy, V.A. Experience of using highly functional concrete in the design of a modern machine / V.A. Beregovoy, K.N. Makhambetova, I.Yu. Lavrov // Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century. – 2023. – No. 5 (280). – P. 31–37.

УДК 691

DOI 10.54734/20722958_2025_2_68

Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46,
тел.: (4722) 309977

Глазков Роман Алексеевич,
аспирант кафедры «Материаловедение
и технологии материалов», старший
преподаватель кафедры «Экспертиза
и управление недвижимостью»
E-mail: romanglazkov1998@yandex.ru

Кожухова Наталья Ивановна,
кандидат технических наук, научный
сотрудник лаборатории перспективных
материалов и технологий, доцент кафедры
«Материаловедение и технология
материалов»
E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

Belgorod National Research University

Russia, 308015, Belgorod, 85, Pobedy St.

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

Russia, 308012, Belgorod, 46,
Kostyukova St.,
tel.: (4722) 309977

Glazkov Roman Alexeevich,
Postgraduate student of the Department
«Materials Science and Materials
Technology», Senior Lecturer of the
Department «Real Estate Expertise and
Management»
E-mail: romanglazkov1998@yandex.ru

Kozhukhova Natalia Ivanovna,
Candidate of Sciences, Research Associate
Laboratory of Advanced Materials and
Technologies, Associate Professor of the
Department «Materials Science and Materials
Technology»
E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

Статья подготовлена по результатам выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей, в рамках национального проекта «Наука и университеты», по научной теме «Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки» (FZWG-2024-0001), с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО НА ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Р.А. Глазков, Н.И. Кожухова

В рамках исследования было изучено влияние некоторых параметров шлакощелочного вяжущего (содержание добавки гипсосодержащего компонента (цитрогипса)), а также способа приготовления вяжущего (т.е. последовательности введения компонентов в сырьевую смесь) на формирование его структурного каркаса, выраженного в показателях средней плотности и прочности на сжатие. Установлено, что последовательность введения сырьевых компонентов в состав шлакощелочного вяжущего в значительной степени оказывает влияние на его физико-механические характеристики. Также выявлено, что введение цитрогипса в состав рассматриваемого шлакощелочного вяжущего негативно отражается на его показателях средней плотности и прочности на сжатие. Снижение компрессионной прочности по сравнению с контрольным составом К1 без цитрогипса в зависимости от последовательности введения сырьевых компонентов колеблется от 33 % до 77 %.

Ключевые слова: шлакощелочное вяжущее, способ введения компонентов, средняя плотность, прочность на сжатие

This work was realized under the support of the State Assignment for the creation of new laboratories in 2021, including under the guidance of young promising researchers of the national project "Science and Universities". The research title is "Elaboration and development of scientific and technological foundations for creating an integrated technology for processing gypsum-containing waste from various industrial enterprises and searching of new ways to use processed products", FZWG-2024-0001. Equipment from the High Technology Center at BSTU named after V. G. Shukhov was used

THE EFFECT OF THE METHOD OF SLAG-ALKALINE BINDER PRODUCTION ON ITS PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS

R.A. Glazkov, N.I. Kozhukhova

The research has examined the influence of some parameters of a slag-alkali binder (the content of the gypsum-containing component additive (citrorogypsum)), and the method of preparing the binder (i.e. the sequence of introducing the components into the raw mix) on the formation of its structural framework, expressed in terms of average density and compressive strength. It is found that the sequence of introducing raw components into the slag-alkali binder significantly affects its physical and mechanical properties. It is also found that the introduction of citrorogypsum into the slag-alkali binder under consideration negatively affects its average density and compressive strength. The decrease in compressive strength compared to the control composition K1 (without citrorogypsum), depending on the sequence of introducing raw components, ranges from 33 % to 77 %.

Keywords: slag cement, method of introducing components, average density, compressive strength

Введение. На сегодняшний день перед предприятиями цементной промышленности стоит задача снижения негативного воздействия на окружающую среду в трех основных аспектах: с позиции высокой энергоемкости; как источника интенсивных загрязняющих выбросов пыли и диоксида углерода в атмосферу; как потребителя колоссальных объемов природных источников сырья. В этой связи замена традиционного портландцементного вяжущего альтернативными видами сырья, побочными продуктами или промышленными отходами стала критической проблемой в рамках подхода экономики замкнутого цикла [1]. Некоторые из используемых или изучаемых заменителей цемента включают топливные золы электростанций [2], микрокремнезем [3], доменный шлак [4] и др. Следует отметить, что доменный шлак является одним из наиболее распространенных твердых побочных продуктов процесса производства чугуна. Рядом научных исследований [5] установлено, что благодаря своей скрытой гидравлической активности этот вид промышленного отхода может выступать достойной альтернативой портландцементу. Более того, доменный гранулированный шлак как вяжущий компонент может использоваться для производства высокопрочного бетона, обеспечивающего улучшенные эксплуатационные характеристики по сравнению с портландцементным аналогом, благодаря более высоким прочностным показателям, лучшей удобоукладываемости, а также за счет снижения таких показателей, как теплота гидратации, проницаемость и пористость [4, 5].

Однако наряду с имеющимися преимуществами шлакощелочные материалы имеют и свои негативные стороны, среди которых:

- необходимость введения дополнительного (кроме воды) активирующего агента в виде щелочей и солей щелочных или щелочноземельных металлов;
- более медленные сроки начала и конца схватывания, а также более длительный период консолидации.

Вышеперечисленные негативные особенности шлакощелочных вяжущих систем вызваны более низкой гидравлической активностью шлаков по сравнению с портландцементом.

В этой связи различные гипсосодержащие отходы являются потенциальным решением, которое позволит снизить негативное влияние этих факторов при получении и использовании вяжущих: в качестве щелочного источника, содержащего катионы Ca^{2+} ; в качестве источника гипса как быстротвердеющего вяжущего [6, 7]. В свою очередь, получение альтернативных традиционному портландцементу вяжущих материалов путем комбинирования экономически доступных сырьевых компонентов (отходов промыш-

ленности) позволяет отвечать трем основным концепциям современной строительной индустрии: технической эффективности, экономичности и экологичности.

Так, результатами полученных экспериментальных данных [8–10] была доказана эффективность гипсосодержащего компонента в вяжущей смеси, которая проявляется при ее концентрациях $\approx 10\%$ мас. Гипсовая составляющая активно ведет себя в структурообразующих процессах, а именно полностью растворяется и участвует в образовании твердого продукта.

В ходе исследований [11] было выявлено, что добавление в шлакощелочную вяжущую систему гипсосодержащего отхода в виде цитрогипса до 5% способствует значительному сокращению сроков схватывания. При этом было установлено, что совместное действие щелочного активатора и гипсосодержащего отхода способно оказывать синергетический эффект на сокращение сроков схватывания вяжущего.

Обнаружена возможность положительного влияния добавки гипсосодержащего отхода на усадочные деформации, характерные для шлакощелочных систем в процессе их твердения.

Также было выявлено [12], что в NaOH-активированной шлакощелочной вяжущей системе, содержащей добавку цитрогипса, наблюдается снижение усадки до двух раз по сравнению с бездобавочным аналогом.

Однако кроме компонентного состава шлакощелочного вяжущего не менее важной является и технология его синтеза.

В связи с этим целью исследований было изучение влияния разных способов приготовления шлакощелочного вяжущего в присутствии гипсосодержащего отхода на особенности его твердения и эксплуатационные характеристики консолидированного композита.

Материалы и методики проведения исследований. В рамках данного исследования были использованы следующие сырьевые компоненты:

- в качестве основного твердофазного сырья применялся доменный гранулированный шлак Новолипецкого металлургического комбината (Россия), измельченный до удельной поверхности $390 \text{ м}^2/\text{кг}$;

- в качестве гипсосодержащего отхода применялся цитрогипс – отход биохимического производства лимонной кислоты (ООО «Цитробел», Россия). Визуально используемый цитрогипс представляет собой мелкодисперсный порошок серого цвета, с удельной поверхностью $361 \text{ м}^2/\text{кг}$;

- в качестве активирующего щелочного агента применялся натр едкий NaOH (ч.д.а.) в соответствии с ГОСТ 4328-77 «Реактивы. Натрия гидроокись. Технические условия».

Химический состав используемых в исследовании твердофазных компонентов и их внешний вид приведены в табл. 1 и на рис. 1 соответственно.

Т а б л и ц а 1

Химический состав исследуемых твердофазных компонентов

Твердофазный компонент	Содержание оксидов, %(вес.)												
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	SrO	P ₂ O ₅	ZrO ₂
Доменный гранулированный шлак	39,75	40,71	7,58	9,48	0,35	0,56	0,54	0,22	0,55	0,13	0,05	0,01	0,02
Цитрогипс	43,3	0,54	0,13	0,06	55,6	–	0,03	–	–	0,15	–	0,08	–

В основу исследования было положено изучение влияния разных способов приготовления шлакощелочного вяжущего (последовательности введения сырьевых компонентов) на формирование его структурного каркаса при твердении с последующей его косвенной оценкой по показателям средней плотности и прочности на сжатие.



Доменный гранулированный шлак



Цитрогипс

Рис. 1. Внешний вид используемых в исследовании твердофазных компонентов

В рамках данного исследования были использованы следующие 5 способов приготовления шлакощелочного вяжущего, различающиеся последовательностью введения сырьевых компонентов:

- 1) шлак + цитрогипс + свежеприготовленный щелочной раствор «щелочь + вода»;
- 2) шлак + свежеприготовленный щелочной раствор «щелочь + вода + цитрогипс»;
- 3) выдержанный щелочной раствор «щелочь + вода» + цитрогипс + шлак;
- 4) шлак + цитрогипс + выдержанный щелочной раствор «щелочь + вода»;
- 5) выдержанный щелочной раствор «щелочь + вода + цитрогипс» + шлак.

Для обеспечения возможности оценки в том числе эффекта от введения добавки цитрогипса были заформованы и изучены контрольные составы (K1 и K2) шлакощелочного вяжущего, приготовленные двумя способами введения сырьевых компонентов:

K1) шлак + свежеприготовленный щелочной раствор «щелочь + вода»;

K2) шлак + выдержанный щелочной раствор «щелочь + вода».

В данном контексте под *свежеприготовленным щелочным раствором* следует понимать смесь из щелочного компонента и воды, перемешанной до полного растворения частиц щелочи и используемой сразу после ее приготовления. В свою очередь, под *выдержанным щелочным раствором* следует понимать смесь из щелочного компонента и воды, перемешанной до полного растворения частиц щелочи, с последующей выдержкой раствора в лабораторных условиях до полного остывания в течение 24 часов перед его применением.

Твердение заформованных составов шлакощелочных вяжущих осуществлялось по следующему режиму: выдержка в водонасыщенном состоянии при температуре $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ в камере с гидрозатвором в течение 24 часов с последующим перемещением в лабораторную пропарочную камеру → подъем температуры в камере до 70°C (≈ 1 час) → изотермическая выдержка при 70°C (≈ 20 часов) → медленное охлаждение в камере до $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ (≈ 3 часа) → расформовка и дальнейшая выдержка в условиях естественной температуры и влажности до момента проведения испытаний.

Экспериментальная часть. В качестве параметров эффективности рассматриваемых способов введения сырьевых компонентов при приготовлении шлакощелоч-

ного вяжущего использовались показатели средней плотности и прочности на сжатие консолидированных образцов.

Результаты испытаний экспериментальных составов вяжущих в возрасте 28 суток представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Показатели средней плотности и прочности на сжатие шлакощелочных вяжущих в зависимости от способа их приготовления

Состав*	Характеристики образцов в возрасте 28 сут	
	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
1	1009	13,8
2	1010	16,3
3	995	23,2
4	1086	34,9
5	968	7,8
K1	1125	34,6
K2	1023	17

* Нумерация составов вяжущих соответствует порядковому номеру способа введения сырьевых компонентов.

Согласно полученным данным (см. табл. 2), наиболее эффективная последовательность введения сырьевых компонентов при получении вяжущего наблюдалась при реализации метода № 4 (состав № 4), который обеспечивал консолидированному композиту показатели средней плотности и компрессионной плотности, сопоставимые с контрольным аналогом без добавки цитрогипса (состав K1): 1086 и 1023 кг/м³; 34,9 и 34,6 МПа для составов № 4 и K1 соответственно. При этом следует отметить, что наилучшие эксплуатационные показатели шлакощелочное вяжущее в присутствии цитрогипса демонстрирует с использованием выдержанного в течение 24 часов щелочного раствора. В то же время в контрольных составах, без цитрогипса, более эффективно работает свежеприготовленный щелочной раствор: показатели прочности на сжатие состава K1 (34,6 МПа) в 2 раза превышают аналогичные данные для состава K2 (17,01 МПа).

В целом следует отметить, что введение цитрогипса в состав рассматриваемого шлакощелочного вяжущего негативно отражается на формировании его структурного каркаса в аспекте показателей средней плотности и компрессионной прочности. Снижение компрессионной прочности по сравнению с контрольным составом K1 в зависимости от последовательности введения сырьевых компонентов колеблется от 33 до 77 %.

На следующем этапе исследования была изучена кинетика изменения физико-механических характеристик шлакощелочных вяжущих во времени в зависимости от способа их приготовления. Полученные графические зависимости отражены на рис. 2.

Согласно полученным данным (рис. 2), в первые 7 суток все экспериментальные составы шлакощелочного вяжущего демонстрируют наиболее высокие показатели компрессионной прочности и средней плотности. В последующие 14 и 28 суток отмеченные параметры имеют тенденцию к снижению. Причем минимальное снижение по показателям прочности и плотности характерно для наиболее оптимальных составов № 4 и K1: на 2,2 и 10 % (по прочности) и на 4,9 и 14 % (по плотности) соответственно.

Визуальный анализ разрушенных образцов шлакощелочных вяжущих (рис. 3) показал, что, несмотря на большой разброс в показателях прочности, образцы имеют схожий характер разрушения (разрушенный образец представляет собой две пирамиды, направленные вершинами друг к другу). При этом для наиболее эффективных составов K1 и №4 в центральной части кубов четко просматриваются более темные участки зеленоватого оттенка по сравнению с остальным массивом. Основываясь на этих наблюдениях, можно предположить наличие взаимосвязи этой зоны, вероятно, как наиболее прочного и компактного участка, с более высокими показателями прочности и плотности образцов для отмеченных составов в целом.

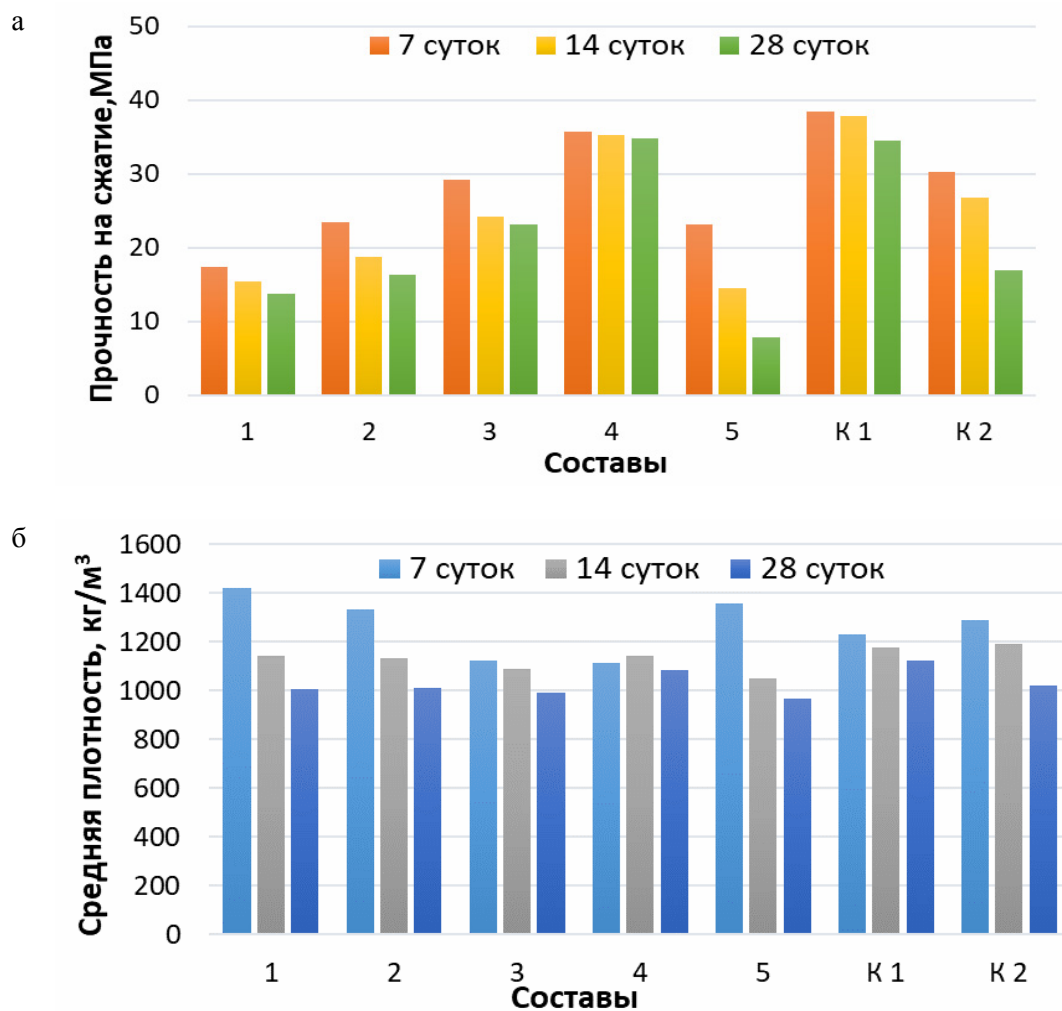


Рис. 2. Кинетика изменения:
а – прочности на сжатие; б – средней плотности шлакощелочных вяжущих во времени



K1



K2



1



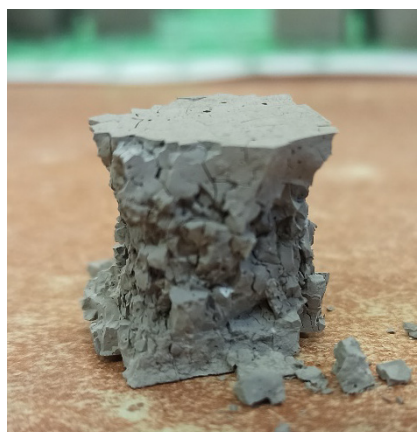
2



3



4



5

Рис. 3. Визуальный анализ характера разрушения образцов шлакощелочных вяжущих

Выводы:

1. Установлено, что способ (последовательность) введения сырьевых компонентов в состав шлакощелочного вяжущего в значительной степени оказывает влияние на формирование его структурного каркаса, косвенно выраженного в данном исследовании в виде показателей средней плотности и прочности на сжатие.
2. Выявлено, что введение цитрогипса в состав рассматриваемого шлакощелочного вяжущего негативно отражается на его показателях средней плотности и прочности на сжатие. Снижение компрессионной прочности по сравнению с контрольным составом (без цитрогипса) в зависимости от последовательности введения сырьевых компонентов колеблется от 33 до 77 %.
3. Выявлены наиболее эффективные, согласно исследованным физико-механическим характеристикам, способы получения шлакощелочного вяжущего:
 - при содержании добавки цитрогипса: шлак + цитрогипс + выдержанный щелочной раствор «щелочь + вода»;
 - без добавки цитрогипса: шлак + свежеприготовленный щелочной раствор «щелочь + вода».
4. Отмечено, что для всех экспериментальных составов шлакощелочного вяжущего (активированных NaOH), независимо от содержания добавки цитрогипса и последовательности введения сырьевых компонентов в рассматриваемый временной период (до 28 суток), наблюдается тенденция снижения их прочности.

Список литературы

1. Lee, H. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material / H. Lee, A. Hanif, M. Usman, J. Sim, H. Oh. – DOI:10.1016/j.jclepro.2017.09.133 // J. Clean. Prod. – 2018. – 170. – P. 683–693.
2. Wang, Y. Recycling combustion ash for sustainable cement production: A critical review with data-mining and time-series predictive models / Y. Wang, Y. Shao, M.D. Matovic, J.K. Whalen. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.031 // Constr. Build. Mater. – 2016. – 123. – P. 673–689.
3. Biskri, Y. Mechanical and durability characteristics of highperformance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates / Y. Biskri, D. Achoura, N. Chelghoum, M. Mouret. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.083 // Constr. Build. Mater. – 2017. – 150. – P. 167–178.
4. Ke, X. Slag-based cements that resist damage induced by carbon dioxide / X. Ke, M. Criado, J.L. Provis, S.A. Bernal. – DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b04730 // ACS Sustain. Chem. Eng. – 2018. – 6. – P. 5067–5075.
5. Liu, J. Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement / J. Liu, Q. Yu, Z. Zuo, F. Yang, W. Duan, Q. Qin. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.040 // Constr. Build. Mater. – 2017. – 131. – P. 381–387.
6. Алфимова, Н.И. Суперсульфатированные цементы: обзорный анализ особенностей свойств, сырья, перспектив производства и применения / Н.И. Алфимова, К.М. Левицкая, М. Ю. Елистраткин, И. Ю. Бухтияров. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-7-8-24 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 7. – С. 8-24.
7. Алфимова, Н. И. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, М.Ю. Елистраткин [и др.]. – DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 11. – С. 8–23.
8. Gijbels, K. Alkali-activated binders based on ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum / K. Gijbels, R.I. Iacobescu, Y. Pontikes, S. Schreur, W. Schroeyers. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.194 // Constr. Build. Mater. – 2019. – 215. – P. 371–380.
9. Rashad, A.M. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles / A.M. Rashad. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.080 // J. Clean. Prod. – 2015. – 87. – P. 717–725.
10. Boonserm, K. Improved geopolymerization of bottom ash by incorporating fly ash and using waste gypsum as additive / K. Boonserm, V. Sata, K. Pimraksa, P. Chindaprasirt. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.04.001 // Cem. Concr. Comp. – 2012. – 34. – P. 819–824.

11. Kozhukhova, N.I. Understanding the relationship between composition and rheology in alkali-activated binders / N.I. Kozhukhova, I.M. Shurakov, M.I. Kozhukhova, M.Yu. Elistratkin, N.I. Alfimova. – DOI: 10.1088/1742-6596/2124/1/012004 // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2124. – 012004.

12. Кожухова, Н.И. Влияние цитрогипса на усадочные деформации в шлакощелочных вяжущих системах / Н.И. Кожухова, Р.А. Глазков, А.И. Коломыцева, И.С. Никулин, А.В. Череватова. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-47-51> // Строительные материалы. – 2023. – № 10. – С. 47–51.

References

1. Lee, H. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material / H. Lee, A. Hanif, M. Usman, J. Sim, H. Oh. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.133 // J. Clean. Prod. – 2018. – 170. – P. 683–693.

2. Wang, Y. Recycling combustion ash for sustainable cement production: A critical review with data-mining and time-series predictive models / Y. Wang, Y. Shao, M.D. Matovic, J.K. Whalen. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.031 // Constr. Build. Mater. – 2016. – 123. – P. 673–689.

3. Biskri, Y. Mechanical and durability characteristics of high performance Concrete containing steel slag and crystallized slag as aggregates / Y. Biskri, D. Achoura, N. Chelghoum, M. Mouret. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.083 // Constr. Build. Mater. – 2017. – 150. – P. 167–178.

4. Ke, X. Slag-based cements that resist damage induced by carbon dioxide / X. Ke, M. Criado, J.L. Provis, S.A. Bernal. – DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b04730 // ACS Sustain. Chem. Eng. – 2018. – 6. – P. 5067–5075.

5. Liu, J. Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement / J. Liu, Q. Yu, Z. Zuo, F. Yang, W. Duan, Q. Qin. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.040 // Constr. Build. Mater. – 2017. – 131. – P. 381–387.

6. Alfimova, N.I. Supersulfated cements: a review analysis of the features of properties, raw materials, production and application prospects / N.I. Alfimova, K.M. Levickaya, M.Yu. Elistratkin, I.Yu. Bukhtiyarov. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-8-24 // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2024. – 7. – P. 8–24.

7. Alfimova, N.I. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, M.Yu. Elistratkin, N.I. Kozhukhova, A.A. Titenko. – DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23 // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2020. – 11. – P. 8–23.

8. Gijbels, K. Alkali-activated binders based on ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum / K. Gijbels, R.I. Iacobescu, Y. Pontikes, S. Schreur, W. Schroeyers. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.194 // Constr. Build. Mater. – 2019. – 215. – P. 371–380.

9. Rashad, A.M. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles / A.M. Rashad. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.080 // J. Clean. Prod. – 2015. – 87. – P. 717–725.

10. Boonserm, K. Improved geopolymerization of bottom ash by incorporating fly ash and using waste gypsum as additive / K. Boonserm, V. Sata, K. Pimraksa, P. Chindaprasirt. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.04.001 // Cem. Concr. Comp. – 2012. – 34. – P. 819–824.

11. Kozhukhova, N.I. Understanding the relationship between composition and rheology in alkali-activated binders / N.I. Kozhukhova, I.M. Shurakov, M.I. Kozhukhova, M.Yu. Elistratkin, N.I. Alfimova. – DOI: 10.1088/1742-6596/2124/1/012004 // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2124. – 012004.

12. Kozhukhova, N.I. Effect of citrogypsum on shrinkage in slag cement / N.I. Kozhukhova, R.A. Glazkov, A.I. Kolomytceva, I.S. Nikulin, A.V. Cherevatova. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-47-51> // Construction Materials. – 2023. – № 10. – С. 47–51.

УДК 544.773

DOI 10.54734/20722958_2025_2_77

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

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

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

Мишина Светлана Ивановна,
кандидат химических наук, доцент
кафедры «Химия и 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) 368209; fax (8412) 368400

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

КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ КАК КРИТЕРИЙ ГИДРОФОБИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ГИПСА

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина

Исследованы гидрофобизация поверхности гипса при изменении концентрации ПАВ в растворе затворения и ее влияние на свойства полученного материала. Установлено, что повышение концентрации ПАВ в исходной суспензии приводит к увеличению краевого угла смачивания твердых частиц до $82,5^{\circ}$ и $77,5^{\circ}$ для ВКЖ-94 и мылонафта соответственно. Однако поверхность сформированного твердого образца, содержащего ВКЖ-94, оставалась гидрофильной: во всех исследованных образцах наблюдали растекание капли воды и быстрое ее всасывание. Твердые образцы, содержащие мылонафт в количестве 3 %, имели гидрофобную поверхность, характеризующуюся краевым углом ее смачивания $82,2^{\circ}$. Вероятно, гидрофильные и гидрофобные свойства твердой поверхности материала определяются объемными свойствами пористой структуры на стадии формирования коагуляционно-кристаллизационных структур. Капиллярные структуры, сформированные в объеме образцов, содержащих гипс и ВКЖ, обеспечивают высокое водопоглощение поверхности. При этом водопоглощение уменьшается после волнового воздействия на раствор затворения и формирования образцов более плотной структуры.

Ключевые слова: гидрофобизация, краевой угол, гипс, ВКЖ-94, мылонафт, ультразвуковая обработка

CONTACT ANGLE AS A CRITERION OF GYPSUM SURFACE HYDROPHOBIZATION

N.G. Vilkova, S.I. Mishina

The hydrophobization of gypsum surface with a change in surfactant concentration in the mixing solution and its effect on the properties of the obtained material have been studied. It is found that an increase in the surfactant concentration in the initial suspension leads to an increase in the contact angle of wetting of solid particles to 82.50° and 77.50° for ethyl silicone oil and sodium naphthenate, respectively. However, the surface of the formed solid sample containing ethyl silicone oil remained hydrophilic: in all the studied samples, water droplet spreading and its rapid absorption were observed. Solid samples containing sodium naphthenate in an amount of 3 % had a hydrophobic surface characterized by a contact angle of 82.20° . Probably, the hydrophilic and hydrophobic properties of the solid surface of the material are determined by the volumetric properties of the porous structure at the stage of formation of coagulation-crystallization structures. Capillary structures

formed in the volume of samples containing gypsum and ethyl silicone oil provide high water absorption of the surface. At the same time, water absorption decreases after the wave action on the mixing solution and the formation of samples of a denser structure.

Keywords: hydrophobization, contact angle, gypsum, ethyl silicone oil, sodium naphthenate, ultrasonic treatment

Введение. Все пористые строительные материалы в той или иной степени быстро разрушаются в результате действия воды. При насыщении водой таких материалов ухудшаются их основные свойства: возрастает объемный вес, понижаются теплоизолирующие способности кладки. Чаще всего процессы разрушения поверхностей строительных материалов, отделочных покрытий фасадов зданий связаны с воздействием на них влаги. При этом пористая структура бетона, штукатурки, гипса обеспечивает высокую водопроницаемость и водопоглощаемость, что приводит к их быстрому разрушению.

Известно, что одной из причин такого разрушительного действия воды является ее высокая растворяющая и корродирующая способность по отношению к неорганическим веществам. Кроме того, негативное воздействие растворителя увеличивается при наличии агрессивных растворенных веществ: аммиака, азотной, хлороводородной и серной кислот, а также их солей, которые не только обеспечивают химическое взаимодействие со строительным материалом, но и повышают его растворимость.

Другой существенной причиной понижения прочности строительных материалов является их попеременное намокание и высыхание. Перемещаясь в порах, вода вызывает неравномерное распределение механических напряжений, а возможная кристаллизация жидкости при низких температурах приводит к разрушению даже прочных пород камня. Очевидно, что увеличение долговечности и прочности строительных материалов заключается не в замене их в элементах конструкций и зданий на новые, что является экономически невыгодным или практически невозможным, а в способности защиты строительных материалов от воздействия окружающей среды.

Известным и широко применяемым на практике способом защиты от разрушительного действия воды является использование гидрофобных покрытий или гидрофобизация поверхности конструкции или материала в объеме на стадии его изготовления. Особое значение имело производство гидрофобного цемента, который, как известно, получают, добавляя поверхностно-активные вещества (ПАВ) – мылонафт, кремнийорганические жидкости и др. – на стадии помола цементного клинкера. Отметим, что первые работы по получению гидрофобного цемента были проведены еще в середине прошлого века профессором М.И. Хигеровичем с сотрудниками. Введенные в цемент добавки изменяют структуру цементного камня и свойства цементных материалов в отношении действия воды и процессов замораживания. Гидрофобизованная известняковая мука, в отличие от обычной, негидрофобизованной, не слеживается и практически не намокает при транспортировке.

Гидрофобизация может производиться как на стадии измельчения твердой фазы, так и на стадии подготовки раствора затворения. В связи с этим различают объемную и поверхностную гидрофобизацию материалов. Для осуществления поверхностной гидрофобизации на поверхность строительного материала наносится раствор соответствующего гидрофобизатора в подходящем для него растворителе. При объемном процессе гидрофобизатор вводится непосредственно в строительный раствор. Широко применяемыми добавками для проведения объемной гидрофобизации в строительной практике являются мылонафт, алкилсиликонаты натрия или калия, алкилхлорсиланы. Процесс гидрофобизации частиц твердой фазы в исходных суспензиях, содержащих растворенное ПАВ, и механизм стабилизации полученных из суспензий новых материалов пористой структуры интенсивно изучались в последнее время [1-5]. При этом свойства полученных материалов (прочность, эластичность) во многом определялись адсорбцией ПАВ на границе раздела твердое тело – жидкость и краевым углом смачивания. Условие закрепления отдельной частицы на межфазной поверхности дано в [6, 7]:

$$\Delta G = \pi R^2 \sigma (1 \pm \cos \theta)^2, \quad (1)$$

где R – радиус частиц; σ – поверхностное натяжение жидкость/газ; θ – краевой угол, который образуется в точке трехфазного контакта между жидкостью, газом и твердой частицей. Здесь знак «+» – для перемещения частицы с поверхности в фазу масла или газ (в случае пены), знак «–» – для перемещения в водную фазу эмульсии или жидкую фазу пены.

Формирование плотного монослоя на границе раздела фаз (жидкость – жидкость или жидкость – газ) сопровождается уменьшением межфазного натяжения с изменением краевого угла θ от 0° к 90° (и от 180° к 90°) [8]:

$$\sigma_p / \sigma = 1 - \pi \cdot (1 - \cos \theta)^2 / 4\sqrt{3}, \quad (2)$$

где σ_p – эффективное межфазное натяжение в присутствии твердых частиц; σ – межфазное натяжение без частиц. Соответственно величина $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_p$ определяет абсолютное понижение межфазного натяжения в результате выхода гидрофобизованной частицы на границу раздела фаз.

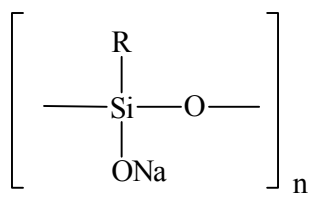
В частности, ранее [5, 9] было показано, что максимальная устойчивость дисперсной системы может коррелировать с гелеобразованием в тонких пленках и наблюдается при максимальной степени гидрофобизации твердых частиц, соответствующей краевому углу ≈ 46 -50 градусов.

Известно, что параметром, на который влияют свойства жидкости и твердой поверхности, является угол, который формирует капля на поверхности. Он определяется в точке трехфазного контакта (между жидкостью, поверхностью твердого тела и газом). При этом условием растекания капли является условие $\sigma_{\text{тг}} \geq \sigma_{\text{тж}}$, где $\sigma_{\text{тг}}$ и $\sigma_{\text{тж}}$ – поверхностные натяжения на границах раздела твердое тело – газ и твердое тело – жидкость соответственно (рис. 1).

Цель работы – анализ степени гидрофобизации поверхности гипса при изменении концентрации ПАВ в растворе затворения и ее влияния на свойства полученного материала.

Материалы и методы исследования. Соли нафтенных кислот, к которым относится также и мылонафт, представляют собой раствор натриевых солей нафтенных кислот. Известно, что в процессе гидрофобизации карбоксильная группа реагирует с карбонатами или оксидами натрия или кальция, входящими в состав вяжущих веществ. При этом образуется гидрофобный слой водоотталкивающей пленки, химически прочно связанный с поверхностью строительного материала.

Известными гидрофобизирующими добавками являются кремнийорганические вещества. К числу таких добавок относят кремнийорганические соединения, наиболее распространенными из которых являются гидролизированный этилдиоксисилан, известный под названием ГКЖ-94, а также метил- и этилсиликонаты натрия:



где R – органические радикалы, чаще всего CH_3 - или C_2H_5 -.

Одной из таких кремнийорганических добавок является этилсиликоновое масло, известное под названием ВКЖ-94.

Для определения краевого угла методом сидячей капли на сформированную твердую поверхность помещают каплю дистиллированной воды и фотографируют. Полученное изображение переносят на компьютер и обрабатывают графическим способом. К этому методу относится оценка краевого угла с помощью пузырька газа, который создается в стеклянной кювете и с помощью шприца помещается на твердую поверхность. Увеличенное микроскопом изображение с помощью веб-камеры переносится на компьютер.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены результаты измерения краевого угла (Θ) в суспензии, содержащей 0,1 % гипса, при изменении концентрации ВКЖ-94.

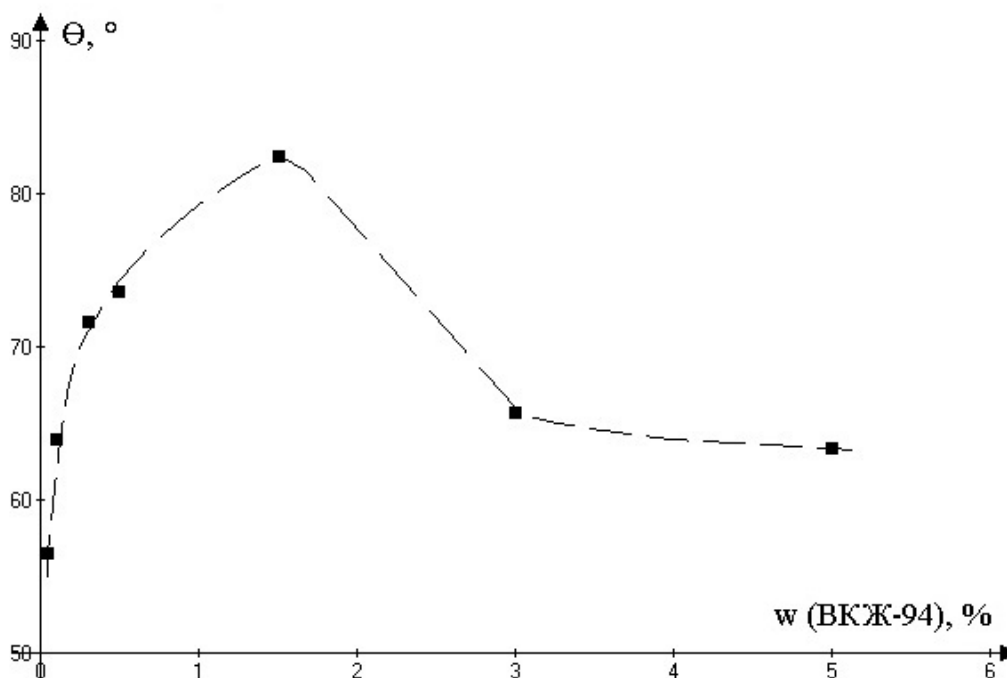


Рис. 1. Зависимость краевого угла от концентрации ВКЖ-94 для суспензии 0,1 % гипса

Как видно из рис. 1, среднее максимальное значение краевого угла составляло $82,45^\circ$ при содержании кремнийорганического соединения в исходной суспензии, равном 1,5 %. Показано, что при повышении содержания твердой фазы более 1,5 % наблюдалось снижение значения краевого угла до $63,3^\circ$ при концентрации ПАВ 5 %. Подобное явление характерно для длинноцепочечных ПАВ и может быть обусловлено вторичной адсорбцией поверхностно-активного вещества. Раствор, содержащий указанное количество ПАВ, использовали для приготовления образцов, поверхность которых исследовали на смачиваемость. Отмечено, что при нанесении капли воды на поверхность сформированного твердого образца при массовом содержании ВКЖ-94 1,5 % и менее происходили растекание капли и быстрое всасывание жидкости. Равновесный краевой угол не формировался на поверхности твердого образца и при увеличении концентрации ПАВ до 10 % в исходном растворе.

Таким образом, гидрофобизация частиц гипса до высоких значений краевых углов ($\Theta = 82,5^\circ$) в исходной суспензии, содержащей гипс и ВКЖ, не приводила к гидрофобизации поверхности твердых образцов. При этом на поверхности твердых образцов, сформированных затворением гипса раствором ВКЖ различной концентрации при изменении соотношения водный раствор/ гипс, наблюдали быстрое (в течение 1–2 секунд) растекание и всасывание воды. Поверхность всех испытанных образцов оставалась гидрофильной.

Было изучено изменение краевого угла в суспензиях, содержащих гипс и мылонафт различной концентрации (рис. 2).

Как видно из рис. 2, увеличение концентрации мылонафта от 0,05 до 1,5 % приводило также к увеличению краевого угла от $56,52^\circ$ до $77,5^\circ$. Однако было установлено, что при содержании ПАВ менее 3% в исходном растворе затворения наблюдали растекание воды на сформированной твердой поверхности образца. Только при концентрации мылонафта в исходной суспензии 3 % и более гидрофобизация твердой поверхности образцов соответствовала краевому углу $82,2^\circ$. Влияние адсорб-

ции ПАВ на формирование дисперсных частиц определенного радиуса показано в таблице.

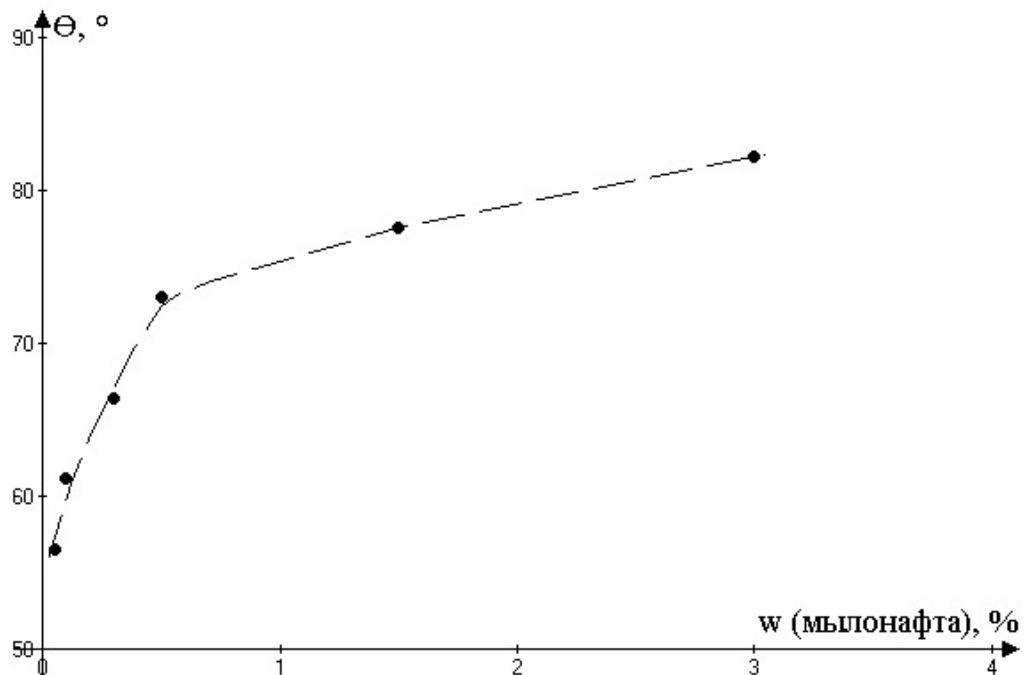


Рис. 2. Зависимость краевого угла от концентрации мылонафта на 0,1 г гипса

Средний радиус частиц в суспензиях состава гипс–вода, гипс + водный раствор ПАВ

Дисперсная система	0,5 % гипса + 10 % ВКЖ-94	0,5 % гипса + 3 % мылонафта	0,5 % гипса	0,5 % гипса + 3 % мылонафта+УЗ
R_{cp} , мкм	7,62	10,10	8,45	9,11

Как видно из приведенной таблицы, более крупные частицы ($R_{cp} = 10,1$ мкм) формировались в суспензиях, содержащих мылонафт. В суспензиях 0,5 % гипса и 0,5 % гипса + 10 % ВКЖ-94 средние радиусы составляли 8,45 и 7,62 мкм соответственно. Обработка суспензии состава 0,5 % гипса + 3 % мылонафта ультразвуком приводила к уменьшению среднего радиуса частиц до 9,11 мкм.

В работах [10, 11] показано, что одним из способов формирования более плотных и однородных образцов цемента является ультразвуковое воздействие на маточный раствор. Отмечено, что результатом волнового влияния на суспензию частиц цемента с массовым содержанием твердой фазы 1,3 % было дробление хлопьев нерастворенных частиц и повышение процентного содержания мелких (со средним радиусом менее трех микрометров) фракций, которые в дальнейшем могут выступать центрами кристаллизации. Увеличение удельной поверхности сформированных с использованием волновой технологии образцов цемента сопровождалось существенным повышением прочности строительного материала на гидравлическом вяжущем. Следует отметить, что создание центров кристаллизации способствует активации процесса роста кристаллов, в результате образуются прочные кристаллизационные образования, заменяющие непрочные коагуляционные связи.

Показано, что волновое влияние на суспензию ПАВ и гипса также приводит в дальнейшем к формированию материала с упорядоченной и более плотной структурой и влияет на физико-химические свойства полученного материала. Как отмечалось, обработка суспензии состава 0,5 % гипса + 3 % мылонафта ультразвуком приводила к уменьшению среднего радиуса частиц. Сформированные с использованием такой суспензии образцы имели более плотную структуру и характеризовались меньшим

водопоглощением. В частности, было изучено движение воды по образцам гипса, содержащего мылонафт. Высота поднятия столба жидкости в течение 55 минут по образцу состава гипс + мылонафт 3 % составляла 8,6 см (рис. 3). При формировании образца с использованием ультразвуковой обработки исходного раствора затворения максимальная высота подъема жидкости составляла 7,9 см к 55-й минуте.

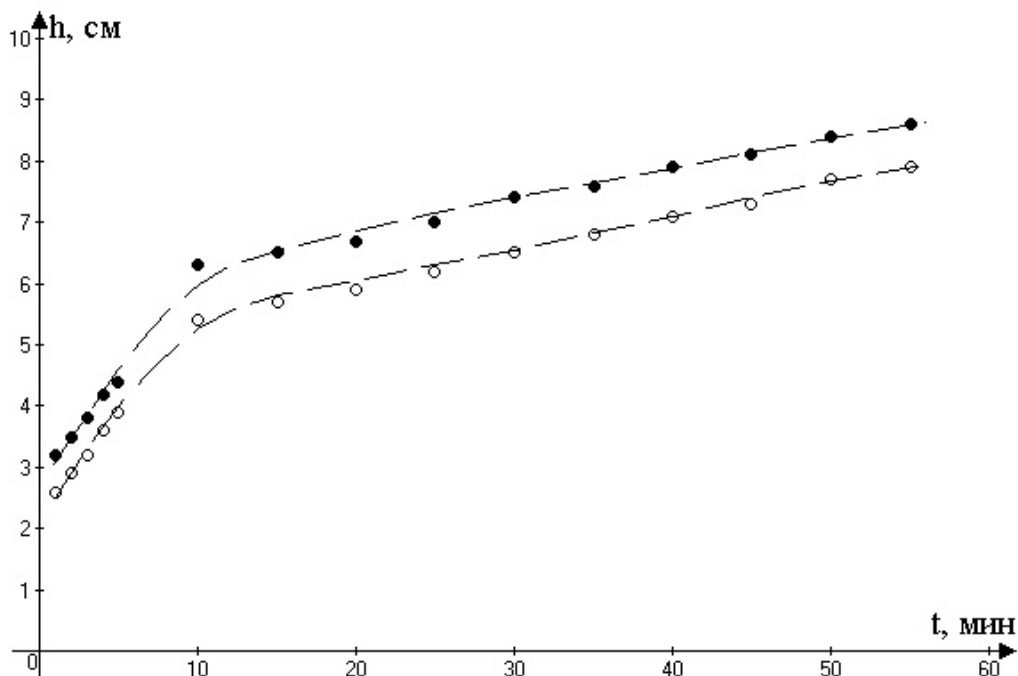


Рис. 3. Изменение высоты поднятия столба жидкости во времени по образцу состава гипс + мылонафт 3 %:

- – с использованием ультразвуковой обработки исходного раствора затворения;
- – без ультразвуковой обработки

Заключение. Анализ влияния степени гидрофобизации частиц гипса в растворе затворения на свойства полученного материала показал, что повышение концентрации ПАВ в исходной суспензии гипса приводило к увеличению краевого угла смачивания твердых частиц до $82,5^{\circ}$ и $77,5^{\circ}$ для ВКЖ-94 и мылонафта соответственно. Однако поверхность сформированного твердого образца, содержащего ВКЖ-94, оставалась гидрофильной: во всех исследованных образцах наблюдали растекание дистиллированной воды и быстрое ее всасывание. Твердые образцы, содержащие мылонафт в количестве 3 %, имели гидрофобную поверхность, характеризующуюся краевым углом ее смачивания $82,2^{\circ}$. Вероятно, гидрофильные и гидрофобные свойства твердой поверхности материала определяются объемными свойствами пористой структуры на стадии формирования коагуляционно-кристаллизационных структур. Капиллярные структуры, сформированные в объеме образцов, содержащих гипс и ВКЖ, обеспечивают высокое водопоглощение поверхности. При этом водопоглощение уменьшалось после волнового воздействия на раствор затворения и формирования образцов более плотной структуры.

Список литературы

1. Blanco, E. Stability and Viscoelasticity of Magneto-Pickering Foams / E. Blanco, S. Lam, S.K. Smoukov, K.P. Velikov // *Langmuir*. – 2013. – № 29. – P. 10019–10027.
2. Saha, M. Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles / M. Saha, M.E. Kabir, S. Jeelani // *Materials science and engineering: A*. – 2008. – № 479. – P. 213–222.

3. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
4. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilкова // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol. 165. – P. 108–116.
5. Vilкова, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilкова, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendeleev Communication*. – 2011. – Vol. 21. – P. 344–345.
6. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B.P. Binks, J. Clint // *Advances in colloid interface science*. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
7. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam : Elsevier, 2000. – 391 p.
8. Levine, S. Stabilization of emulsions by fine particles I. Partitioning of particles between continuous phase and oil/water interface / S. Levine, B.D. Bowen, S.J. Partridge // *Colloids and surfaces*. – 1989. – Vol. 38. – P. 325–345.
9. Vilкова, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of interfacial tension / N.G. Vilкова, A. V. Nushtaeva // *Mendeleev Communications*. – 2013. – Vol. 23. – P. 155–156.
10. Фокин, Г.А. Влияние размеров частиц и их массового содержания в исходной суспензии на прочность цементного камня / Г.А. Фокин, Н.Г. Вилкова, А.С. Гуськов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2014. – №2. – С. 11–16.
11. Фокин, Г.А. Волновая технология материалов на гидравлическом вяжущем / Г.А. Фокин, А.С. Гуськов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2014. – №4. – С. 31–36.
12. Binks, B.P. Dispersion behavior and aqueous foams in mixtures of a vesicle-forming surfactant and edible nanoparticles / B.P. Binks, S. Campbell, S. Mashinchi, M.P. Piatko // *Langmuir*. – 2015. – Vol. 31. – P. 2967–2978.
13. Asghari, A.K. Interfacial and foaming characterisation of mixed protein-starch particle systems for food-foam applications / A.K. Asghari, I. Norton, T. Mills, P. Sadd, F. Spyropoulos // *Food Hydrocolloids*. – 2016. – Vol. 53. – P. 311–319.

References

1. Blanco, E. Stability and Viscoelasticity of Magneto-Pickering Foams / E. Blanco, S. Lam, S.K. Smoukov, K.P. Velikov // *Langmuir*. – 2013. – № 29. – P. 10019–10027.
2. Saha, M. Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles / M. Saha, M.E. Kabir, S. Jeelani // *Materials science and engineering: A*. – 2008. – № 479. – P. 213–222.
3. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
4. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilкова // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol. 165. – P. 108–116.
5. Vilкова, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilкова, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendeleev Communication*. – 2011. – Vol. 21. – P. 344–345.
6. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B.P. Binks, J. Clint // *Advances in colloid interface science*. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
7. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam : Elsevier, 2000. – 391 p.

8. Levine, S. Stabilization of emulsions by fine particles I. Partitioning of particles between continuous phase and oil/water interface / S. Levine, B.D. Bowen, S.J. Partridge // *Colloids and surfaces*. – 1989. – Vol. 38. – P. 325–345.
9. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of interfacial tension / N.G. Vilkova, A. V. Nushtaeva // *Mendelev Communications*. – 2013. – Vol. 23. – P. 155–156.
10. Fokin, G.A. Influence of particle sizes and their mass content in the initial suspension on the strength of cement stone / G.A. Fokin, N.G. Vilkova, A.S. Guskov // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2014. – № 2. – P. 11–16.
11. Fokin, G.A. Wave technology of materials on a hydraulic binder / G.A. Fokin, A.S. Guskov // *Regional architecture and engineering*. – 2014. – № 4. – P. 31–36.
12. Binks, B.P. Dispersion behavior and aqueous foams in mixtures of a vesicle-forming surfactant and edible nanoparticles / B.P. Binks, S. Campbell, S. Mashinchi, M.P. Piatko // *Langmuir*. – 2015. – Vol. 31. – P. 2967–2978.
13. Asghari, A.K. Interfacial and foaming characterisation of mixed protein-starch particle systems for food-foam applications / A.K. Asghari, I. Norton, T. Mills, P. Sadd, F. Spyropoulos // *Food Hydrocolloids*. – 2016. – Vol. 53. – P. 311–319.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2025_2_85

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Тамбовский государственный технический
университет

Россия, 392000, г. Тамбов,
ул. Советская, д. 106/5

Езерский Валерий Александрович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Архитектура
и градостроительство»
E-mail: wiz75micz@rambltr.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»
E-mail: loganin@mai.ru

Tambov State Technical University

Russia, 392000, Tambov,
106/5, Sovetskaya St.

Ezerskiy Valery Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Architecture and Urban
Planning»
E-mail: wiz75micz@rambltr.ru

ШТУКАТУРНЫЕ РАСТВОРЫ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ИЗВЕСТИ

В.И. Логанина, В.А. Езерский

Приведены сведения о свойствах гидравлической извести как связующего при изготовлении штукатурного раствора. Выявлен минералогический состав композита на основе гидравлической извести. Даны значения прочности известкового композита

Ключевые слова: гидравлическая известь, прочность, портландит, силикат кальция, штукатурный раствор, прочность

PLASTERING MORTARS BASED ON HYDRAULIC LIME

V.I. Loganina, V.A. Ezerskiy

The article provides information on the properties of hydraulic lime as a binder in the manufacture of plaster mortar. The mineralogical composition of the composite based on hydraulic lime is revealed. The strength values of the lime composite are given.

Keywords: hydraulic lime, strength, portlandite, calcium silicate, plaster mortar, strength

Для реставрации зданий и сооружений широкое применение находят известковые сухие строительные смеси [1-4]. Для придания раствору эластичности, повышения его прочности и износостойкости в известковый раствор добавляют доломитовую муку. Многие российские производители используют в качестве наполнителя молотый кварцевый песок. Однако ведущие иностранные производители предпочитают фракционированный доломит, кубовидная форма которого способствует повышению адгезии [5].

Установлено, что на свойства известкового раствора больше влияет тип заполнителя, чем водоизвестковое соотношение [6]. Известняк и вулканический материал как заполнители больше подходят для приготовления известкового раствора, чем другие кремнистые заполнители. Прочность на сжатие известкового раствора можно увеличить с 0,3~0,7 до 2,5 МПа, применив заполнители угловатой формы.

Органические или неорганические добавки могут способствовать образованию плотной структуры известкового раствора [7-10]. Такой раствор, содержащий высокоактивные пуццолановые материалы, при весовом соотношении метакеолинит/известь 1:1 имеет более высокую прочность на сжатие. Применение добавок, содержащих SiO₂ и т. д., способствует повышению его долговечности.

Представляет интерес при разработке рецептуры штукатурного раствора применение гидравлической извести. Преимущества использования гидравлической извести:

- экологическая чистота (этот материал, как уже упоминалось, производится исключительно из натурального сырья);
- паропроницаемость (благодаря этому свойству гидравлической извести снижается вероятность образования конденсата в стенах тех зданий, которые были возведены с использованием растворов на её основе);
- отсутствие высолов (на стенах, возведённых с использованием растворов, содержащих гидравлическую известь, никогда не появляются белые пятна).

Согласно стандарту EN 459-1, гидравлическая известь классифицируется как NHL 2, NHL 3,5 и NHL 5. Индийский стандарт признает только два типа гидравлической извести: класс А – исключительно гидравлическую для строительных целей и класс В – полугидравлическую для использования в каменной кладке. В соответствии с российским стандартом (ГОСТ 9179-77. Известь строительная. Технические условия) гидравлическая известь делится на слабогидравлическую и сильногидравлическую. Прочность гидравлической извести в возрасте 28 суток при твердении по установленным нормам (ГОСТ 22688-77. Известь строительная. Методы испытания) должна быть не менее:

- при изгибе 0,4 МПа – для слабогидравлических; 1,0 МПа – для сильногидравлических известей;
- при сжатии 1,7 МПа – для слабогидравлических; 5,0 МПа – для сильногидравлических известей.

Современная тенденция в области сохранения архитектуры в Европе заключается в использовании гидравлической извести категории NHL или NHL-Z в соответствии со спецификацией EN 459. Растворы на основе натуральной гидравлической извести (NHL) широко применяются для реставрационных работ благодаря хорошей совместимости с материалом основания с точки зрения физических, химических и механических свойств.

Из-за различного минералогического состава и, следовательно, разных процессов твердения растворы на основе гидравлической извести обладают иными свойствами по сравнению с растворами на основе воздушной извести. Пористость у гидравлических растворов ниже, чем у известковых, и они могут достигать более высоких механических свойств. Гидравлические известковые растворы обладают лучшей адгезией к основанию, однако имеют меньшую пластичность по сравнению с растворами воздушной извести.

Гидравлическая известь в основном используется в качестве строительного штукатурного раствора.

Анализ литературных данных свидетельствует о широком применении в прошлом при строительстве и ремонте зданий и сооружений гидравлической извести в качестве самостоятельного вяжущего либо как добавки к воздушной извести [11]. Гидравлическая известь (NHL) используется в качестве связующего при реставрации, хорошо сочетающегося с существующей исторической кладкой.

В работе [12] отмечается, что добавление 10 % гидравлической извести значительно повышает физико-механические показатели раствора на основе воздушной извести, а раствор, содержащий 100 % гидравлической извести, показал более высокое значение прочности при сжатии (5,61 МПа). Это доказывает, что добавление гидравлической извести в известковые растворы позволяет использовать их в качестве раствора для гидроизоляции.

При разработке рецептуры штукатурного раствора в качестве вяжущего применяли гидравлическую известь «Тамасли» NHL5. Гидравлический модуль извести составляет $M = 2,69$. Минералогический состав гидравлической извести представлен в табл.1.

В качестве добавки к гидравлической извести в работе применяли гашеную известь (пушонка) истинной плотностью 2230 кг/м^3 , насыпной плотностью 280 кг/м^3 , активностью 83 %, с удельной поверхностью $S_{уд}=559 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Устанавливали оптимальное соотношение между гидравлической и воздушной известью. С этой целью готовили образцы на основе составов с одинаковым водоизвестковым отношением, равным В/И=1,0. Образцы твердели в воздушно-сухих условиях. Результаты исследований приведены в табл.2.

Минералогический состав гидравлической извести

Наименование минералов	Химическая формула	Значения
Карбонат кальция не прокалённый	CaCO_3	0,1
Двухкальциевый силикат	2CaSiO_2	48,7
Гидроксид кальция (свободная гашеная гидратная известь)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	5,3
Сульфат кальция (гипс)	CaSO_4	35,8
Оксид кальция (негашеная известь)	CaO	0,6
Оксид магния	MgO	1,7
Карбонат магния	MgCO_3	1,1
Карбонат магния-кальция доломит	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	4,7
Алюминат трикальция	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	1,5
Алюмоферрит кальция (феррит)	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	0,5

Т а б л и ц а 2

Значения прочности известкового камня в возрасте 28 суток твердения

Наименование состава	Значение прочности при сжатии, кгс/см ²
Гидравлическая известь NHL5	20,5
Гидравл. известь NHL5: воздушная известь =1:0,1	16,5
Гидравлическая известь NHL5:воздушная известь =1:0,25	14
Гидравлическая известь NHL5:воздушная известь =1:0,428	8,5
Гидравлическая известь NHL5:воздушная известь =1:1	4
Гидравлическая известь NHL5:воздушная известь =1:1,5	3,8
Воздушная известь	1,3

Анализ данных свидетельствует, что по мере увеличения содержания воздушной извести наблюдается снижение прочности при сжатии. При содержании воздушной извести в количестве 25 % от массы гидравлической извести прочность при сжатии составляет 14кгс/см², а при соотношении гидравлическая известь NHL5:воздушная известь =1:1 прочность составляет 4 кгс/см², в то время как прочность образцов на основе гидравлической извести – 20,5 кгс/см². Принято оптимальное соотношение гидравлическая известь: воздушная известь, равное 1:0,25.

Был проведен ДТА известковых образцов с помощью установки «Термоскан-2». Анализ проводили в интервале температур 20–1000°C в атмосфере воздуха при скорости нагрева 5°C/мин. На рис.1, 2 представлены полученные в результате проведения эксперимента кривые дифференциально-термического анализа (ДТА) образцов.

При ДТА композита на основе гидравлической извести выявлено, что эндотермический эффект при температуре 93–173°C (см. рис.1), а на основе гидравлической и воздушной извести при температуре 90–190°C (см. рис. 2) связан с удалением адсорбированной воды, а также с частичным обезвоживанием гидроалюминатов кальция, которое сопровождается потерей массы в образце на основе гидравлической извести, равной 13,43 %, а на основе гидравлической и воздушной извести – 7,86 %. Экзоэффект, составляющий $Q = 23,38$ Дж/г (см. рис. 2), вызван наличием выделившейся в процессе гидратации гелеобразной массы. Содержание гелеобразной массы в образце на основе только гидравлической извести значительно меньше, о чем свидетельствует величина экзотермического эффекта, составляющая $Q = 1,589$ Дж/г.

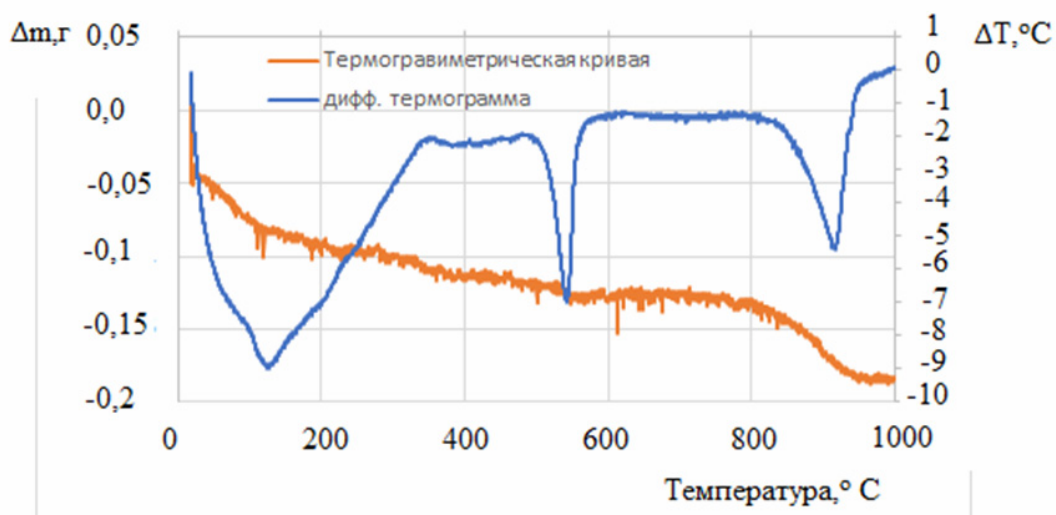


Рис. 1. Кривые дифференциально-термического анализа образцов на основе гидравлической извести

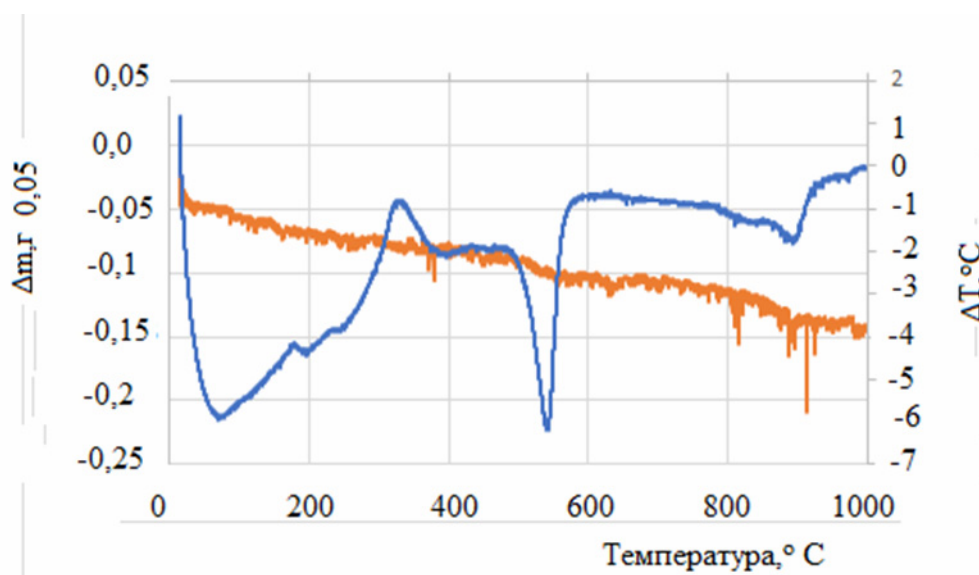


Рис. 2. Кривые дифференциально-термического анализа образцов на основе гидравлической и воздушной извести

Интенсивный эндозффект на термограмме в интервале $(486,4\text{--}576,1)^\circ\text{C}$ связан с дегидратацией портландита, а также с удалением первоначально химически связанной воды. Кроме того, эндотермический эффект в данном интервале температур также подтверждает наличие в системе гидрокарбоната кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, который, как известно, разлагается при температуре $373\text{--}573\text{ K}$. При сравнении термограмм выявлено, что тепловой эффект, связанный с дегидратацией портландита, в образцах на основе гидравлической и воздушной извести больше и составляет $Q=116,36\text{ Дж/г}$ (см. рис. 2), что обусловлено большим содержанием в данных образцах портландита по сравнению с образцами на основе гидравлической извести.

Эндоэффект в интервале температур $820,5\text{--}963^\circ\text{C}$ (см. рис. 1) и $859,5\text{--}923,6^\circ\text{C}$ (см. рис. 2) обусловлен диссоциацией кальцита и наиболее выражен у образцов на основе гидравлической извести. Эндоэффект составляет $Q = 149,88\text{ Дж/г}$, потеря массы – $17,9\%$, в то время как в образцах на основе гидравлической и воздушной извести соответственно $Q=32,087\text{ Дж/г}$ и $\Delta m=15,73\%$. Это связано с тем, что после высыхания в раствор на основе гидравлической извести проникает углекислый газ и превращает гашеную известь в карбонат кальция. Диоксид углерода также расщепляет гидрати-

рованный силикат кальция на карбонат кальция, увеличивая его содержание, и аморфный кремнезем.

Дополнительно оценивали степень карбонизации образцов спустя 2 месяца твердения в воздушно-сухих условиях при температуре 25°C и относительной влажности 60 %. Степень карбонизации оценивали по изменению толщины карбонизированного слоя. Толщину карбонизированного слоя определяли нанесением 1 %-го спиртового раствора фенолфталеина на скол опытного образца. Области некарбонизированной извести реагируют на фенолфталеин, окрашиваясь в фиолетовый цвет. На рис. 3 приведены фотографии толщины карбонизированного слоя образцов.

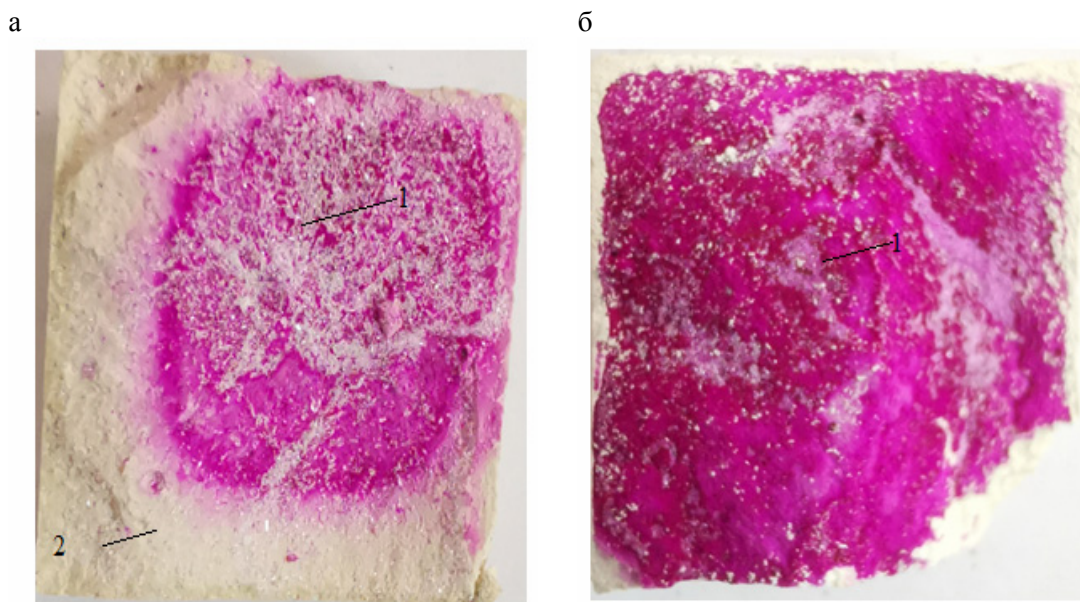


Рис. 3. Изменение толщины карбонизированного слоя известковых образцов в возрасте 2 месяцев:

а – образец на основе гидравлической извести;

б – образец на основе гидравлической и воздушной извести;

1 – некарбонизированный слой; 2 – закарбонизированный слой

Видно, что процесс карбонизации начинается в поверхностном слое материала (карбонизированные участки не окрашены), постепенно направляется внутрь образца (рис.3,а). Наибольшая степень карбонизации наблюдается на образцах на основе гидравлической извести (окрашена только небольшая область в центре образца). Образец на основе гидравлической и воздушной извести практически не закарбонизировался.

Таким образом, определено оптимальное соотношение между гидравлической и воздушной известью. Установлено, что образцы на основе гидравлической извести спустя 2 месяца твердения в воздушно-сухих условиях в большей степени подвержены карбонизации за счет углекислого газа атмосферы по сравнению с образцами на основе смешанного вяжущего.

Список литературы

1. Von Landsberg, D. The history of lime production and use from early times to the industrial revolution / D. Von Landsberg // Zement-Kalk-Gips. – 1992. – 45. – P. 199–203.
2. Degryse, P. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation / P. Degryse, J. Elsen, M. Waelkens // Cem Concr Res. – 2002. – 32. – P. 1457–1463.

3. Пухаренко, Ю.В. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю.В. Пухаренко, А.М. Харитонов, Н.Н. Шангина, Т.Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1. – С. 98–103.
4. Чулкова, И.Л. Возможность использования сухих смесей для реставрации и реконструкции объектов старины из известняка на основе закона сродства структур / И.Л. Чулкова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2013. – №6(34). – С.66–69.
5. Beck, Kevin. Formulation and characterization of a mortar of lime suited for the use(custom) with the stone of porous lime / Kevin Beck, Muzahim Al-Mukhtar Springer-Verlag. – 2008. – P.113–135.
6. Kelouaz Khaled. Mortar of lime and natural cement for the restoration of built cultural heritage / Kelouaz Khaled, Guebboub Lakhdar Salim, Deloum Said, Hamiene Massouad // International Journal of Engineering Research & Science (IJOER). – 2016. – Vol-2, Issue-1.
7. Логанина, В.И. Исследования закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Строительные материалы. – 2011. – № 12. – С. 62–65.
8. Логанина, В.И. Тонкодисперсный наполнитель на основе силикатов кальция для известковых смесей / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 5 (52). – С. 144–147.
9. Логанина, В.И. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, О.А. Давыдова // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 53–57.
10. Ventolà, M. Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics / M. Ventolà, P. Vendrell, L. Merino Giraldez // Construction and Building Materials. – August 2011. – Vol. 25, Iss. 8. – P. 3313–3318. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.020>.
11. Callebaut, K. Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium). Natural hydraulic lime or cement / K. Callebaut, J. Elsen, K. Van Balen, W. Viaene // Cem Concr Res. – 2001. – 31. – P. 397–403.
12. Avenier, Cédric. Natural cement, published Glénat / Cédric Avenier, Bruno Rosier, Denis Sommain. – Grenoble, 2007. – P.71–90.

References

1. Von Landsberg, D. The history of lime production and use from early times to the industrial revolution / D. Von Landsberg // Zement-Kalk-Gips. – 1992. – 45. – P. 199–203.
2. Degryse, P. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation / P. Degryse, J. Elsen, M. Waelkens // Cem Concr Res. – 2002. – 32. – P. 1457–1463.
3. Pukhareno, Yu.V. Restoration of historical objects using modern dry construction mixtures / Yu.V. Pukhareno, A.M. Kharitonov, N.N. Shangina, T.Yu. Safonova // Bulletin of civil engineers. – 2011. – No. 1. – P. 98–103.
4. Chulkova, I.L. The possibility of using dry mixtures for the restoration and reconstruction of ancient objects made of limestone based on the law of affinity of structures / I.L. Chulkova // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy. – 2013. – No. 6 (34). – P. 66–69.
5. Beck, Kevin. Formulation and characterization of a mortar of lime suited for the use(custom) with the stone of porous lime / Kevin Beck, Muzahim Al-Mukhtar Springer-Verlag. – 2008. – P.113–135.
6. Kelouaz Khaled. Mortar of lime and natural cement for the restoration of built cultural heritage / Kelouaz Khaled, Guebboub Lakhdar Salim, Deloum Said, Hamiene Massouad // International Journal of Engineering Research & Science (IJOER). – 2016. – Vol.2, Issue.1.

7. Loganina, V.I. Research of regularities of influence of silicic acid sol on structure and properties of diatomite / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // *Construction materials*. – 2011. – № 12. – P. 62–65.
8. Loganina, V.I. Finely dispersed filler based on calcium silicates for lime mixtures / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Bulletin of civil engineers*. – 2015. – № 5 (52). – P. 144–147.
9. Loganina, V.I. Optimization of composition of composites for general construction purposes, modified with nanosized additives / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, O.A. Davydova // *Regional architecture and engineering*. – 2010. – № 2. – P. 53–57.
10. Ventolà, M. Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics / M. Ventolà, P. Vendrell, L. Merino Giraldez // *Construction and Building Materials*. – August 2011. – Vol. 25, Iss. 8. – P. 3313–3318. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.020>.
11. Callebaut, K. Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium). Natural hydraulic lime or cement / K. Callebaut, J. Elsen, K. Van Balen, W. Viaene // *Cem Concr Res*. – 2001. – 31. – P. 397–403.
12. Avenier, Cédric. Natural cement, published Glénat / Cédric Avenier, Bruno Rosier, Denis Sommain. – Grenoble, 2007. – P.71–90.

Институт химии твердого тела и
механохимии Сибирского отделения РАН
Россия, 630128, Новосибирск, Кутателадзе, 18,
тел.: (383) 332-40-02

Варенцов Валерий Константинович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: vvk@ngs.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

Кузина Валентина Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы», действительный
член Нью-Йоркской академии наук

*Institute of Solid and Mechanochemistry of
the Siberian Branch of RAS*
Russia, 630128, Novosibirsk, 18, Kutateladze St.,
tel.: (383) 332-40-02

Varentsov Valery Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: vvk@ngs.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

Kuzina Valentina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Information and
Computing Systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Koshev Aleksander Nikolaevich,
Doctor of Chemical Sciences, Professor of the
Department «Information and Computing
Systems», Full member of the New York
Academy of Sciences

Исследование выполнено по гранту Российского научного фонда № 25-21-00135,
<https://rscf.ru/project/25-21-00135/>

РЕАКЦИОННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАК ОДНА ИЗ ВАЖНЕЙШИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ И НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЗАЦИИ УГЛЕГРАФИТОВЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.К. Варенцов, В.В. Кузина, А.Н. Кошев

Рассмотрены и проанализированы весовой и электрохимический методы определения удельной реакционной поверхности углеграфитовых волокнистых материалов (УВМ) как основной характеристики при создании композиционных и наноконпозиционных материалов на основе УВМ. Показано, что электрохимический способ более корректен для нахождения удельной поверхности УВМ при их использовании в процессах, контролируемых диффузией. Отмечено, что правильное определение реакционной поверхности УВМ как одной из основных характеристик, обеспечивающих значительную интенсификацию электрохимических процессов в проточных трехмерных электродах (ПТЭ) с катодами на основе углеродных волокнистых материалов, имеет важное значение при технологической разработке процессов металлизации и оптимизации процессов электроосаждения металлов.

Ключевые слова: углеграфитовые волокнистые материалы, композиционные и наноконпозиционные материалы, электрохимическая система, реакционная поверхность, гальваническая металлизация

REACTION SURFACE AS ONE OF THE MOST IMPORTANT CHARACTERISTICS OF COMPOSITES AND NANOCOMPOSITES BASED ON METALLIZATION OF CARBON-GRAPHITE FIBER MATERIALS

V.K. Varentsov, V.V. Kuzina, A.N. Koshev

The gravimetric and electrochemical methods for determining the specific reaction surface of carbon-graphite fibrous materials (CFM) as the main characteristic in the production of composite and nanocomposite materials based on CFM are considered and analyzed. It is shown that the electrochemical method is more correct for finding the specific surface of CFM when using them in processes controlled by diffusion. It is shown that the correct determination of the reaction surface of CFM, as one of the main characteristics that ensures significant intensification of electrochemical processes in flow three-dimensional electrodes (FTE) with cathodes based on carbon fibrous materials, is of decisive importance in the technological development of metallization processes and determining the optimal parameters of metal electrodeposition processes.

Keywords: carbon graphite fibrous materials, composite and nanocomposite materials, electrochemical system, reaction surface, galvanic metallization

Введение. В настоящее время углеродные материалы широко используются при создании композиционных и наноконпозиционных материалов различного назначения: конструкционных материалов, химических источников тока, катализаторов, электродных материалов и др. [1, 2]. Следует выделить одно из основных направлений получения композиционных материалов – нанесение наночастиц металлов и (или) сплавов металлов на углеродные материалы (УМ). Для создания композитов на основе углеродных материалов требуется разработка такого процесса нанесения металлов и их соединений на поверхность частиц, составляющих трехмерную углеродную систему, который обеспечивал бы хорошую адгезию с поверхностью углеродного материала и равномерное распределение металлического осадка по объему УМ. Правильная организация процесса гальванической металлизации УВМ позволяет управлять процессом осаждения металла посредством выбора токового, гидродинамического режимов, выбора конструкционных особенностей электрохимической системы, выбора режима подачи электролита определенного состава и прочих технологических условий. Одной из основных характеристик, обеспечивающих значительную интенсификацию электрохимического процесса извлечения металлов из растворов переработки минерального и техногенного сырья и металлизации УВМ из электролитов в проточном трехмерном электроде, является высокоразвитая реакционная поверхность электрода. Описанию, анализу и сравнению методов определения удельной реакционной поверхности (S_v) УВМ посвящена настоящая публикация.

Определение параметров углеродных волокнистых материалов. В разбавленных растворах, где проявляются преимущества УВМ, электродные процессы обычно лимитируются диффузией. Толщину диффузионного слоя, ограничивающего поверхность разряда, при диффузионном контроле процесса для волокон диаметром 10 мкм можно принять равной 10^{-4} см.

Очевидно, что в этом случае реакционная поверхность УВМ, равная суммарной боковой поверхности волокон, будет увеличиваться за счет рельефа на поверхности волокон размером больше 10^{-4} см. Величина реакционной поверхности УВМ оценивалась двумя способами: весовым и с помощью электрохимических измерений. В первом случае волокна аппроксимировались цилиндрической формой со средним радиусом (r), определенным по микрофотографиям образцов [3,4,5]. Исходя из существующих представлений о поверхностях такого рода объемных структур, получили выражение для оценки реакционной поверхности исследуемого образца материала:

$$S^b = 2P_{\text{обр}}/r, \quad (1)$$

где $P_{\text{обр}}$ – вес образца УВМ; r – плотность волокна; S^b – значения удельной поверхности УВМ, полученные весовым методом (табл. 1–2).

Величина реакционной поверхности S^o , доступная электролизу для процессов, лимитируемых диффузией, может быть определена из электрохимических измерений [3, 5]. Установка и ячейки, на которых проводились исследования, представлены на рис. 1, 2. Величина S^o определялась из известного для диффузионных процессов соотношения

$$S^o = (m_v / K_M) \ln(C_{\text{вх}} / C_{\text{вых}}), \quad (2)$$

где m_v – объемная скорость потока раствора через электрод; K_M – коэффициент массопереноса; $C_{\text{вх}}$ и $C_{\text{вых}}$ – концентрация электроактивного вещества соответственно на входе и выходе из электрода.

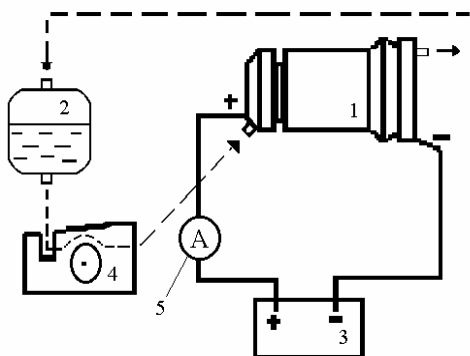


Рис. 1. Схема установки:

1 – электрохимическая ячейка; 2 – емкость для электролита;
3 – источник постоянного тока Б5-49; 4 – перистальтический насос типа РР-304; 5 – амперметр

Для исследования использовали раствор следующего состава (моль/л): $\text{CuSO}_4 - 10^{-3}$, $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0,25$, скорость потока раствора $0,61 \text{ см}^2/\text{с}$, толщина электрода $0,25 \text{ см}$. Значение коэффициента массопереноса, рассчитанное для этого раствора, – $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}$. Поскольку формула (1) применима для электроосаждения металла на предельном диффузионном токе, предварительно для каждого материала изучались зависимости $C_{\text{вх}}/C_{\text{вых}}$ от значений тока, из которых определялась область плотностей тока, при которой весь объем электрода работает на предельном диффузионном токе. Данные по изменению концентрации меди в растворе использовались для расчета реакционной поверхности.

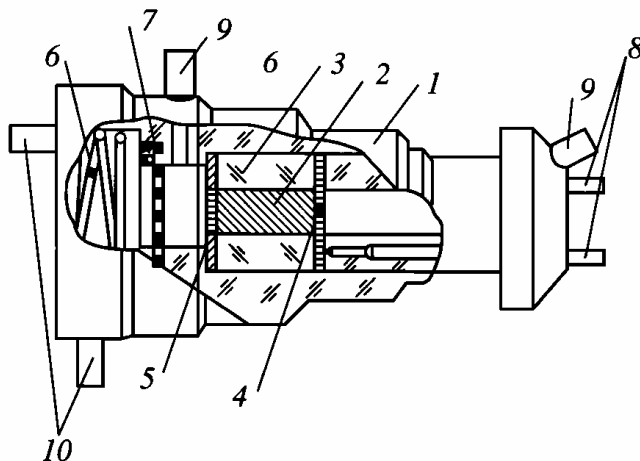


Рис. 2. Схема электрохимической ячейки:

1 – корпус; 2 – углеродный волокнистый электрод; 3 – вкладыш;
4 – перфорированный токоподвод; 5 – полипропиленовая сетка;
6 – анод; 7 – ионообменная мембрана; 8 – токоподводы;
9, 10 – штуцера для подвода и отвода католита и анолита

Как видно из табл. 1, значения реакционной поверхности нетканых УВМ, определенные электрохимическим методом, практически для всех материалов больше,

чем определенные по весовому методу. Причем для материалов, поперечный разрез которых представляет собой сложную форму (рис. 4), эти расхождения выше (достигают 40 %), чем для материалов, волокна которых близки к цилиндрической форме (рис. 3). Это показывает, что величина реакционной поверхности нетканых УВМ, определенная как реакционная поверхность материалов, состоящих из волокон строгой цилиндрической формы, может служить только оценочной характеристикой. Т.е. электрохимический способ более корректен для нахождения поверхности нетканых УВМ при использовании их в процессах, контролируемых диффузией [3–6].

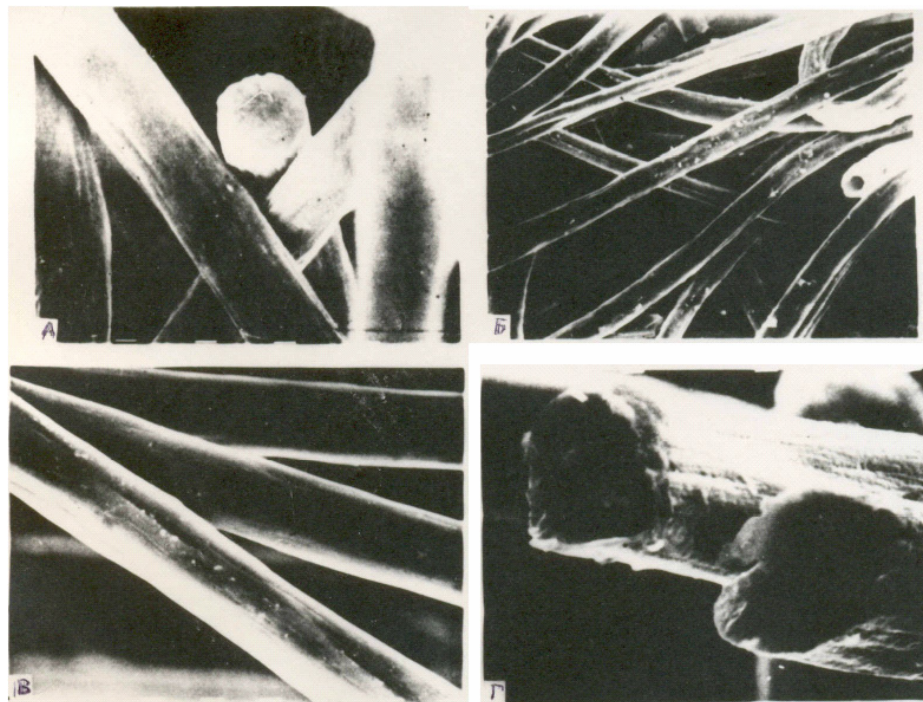


Рис. 3. Образцы УВМ: А – ВНГ-30 ($\times 2000$); Б – ВНГ-50 ($\times 500$); В – ФРН ($\times 1500$); Г – ВНГ-50 ($\times 3500$)

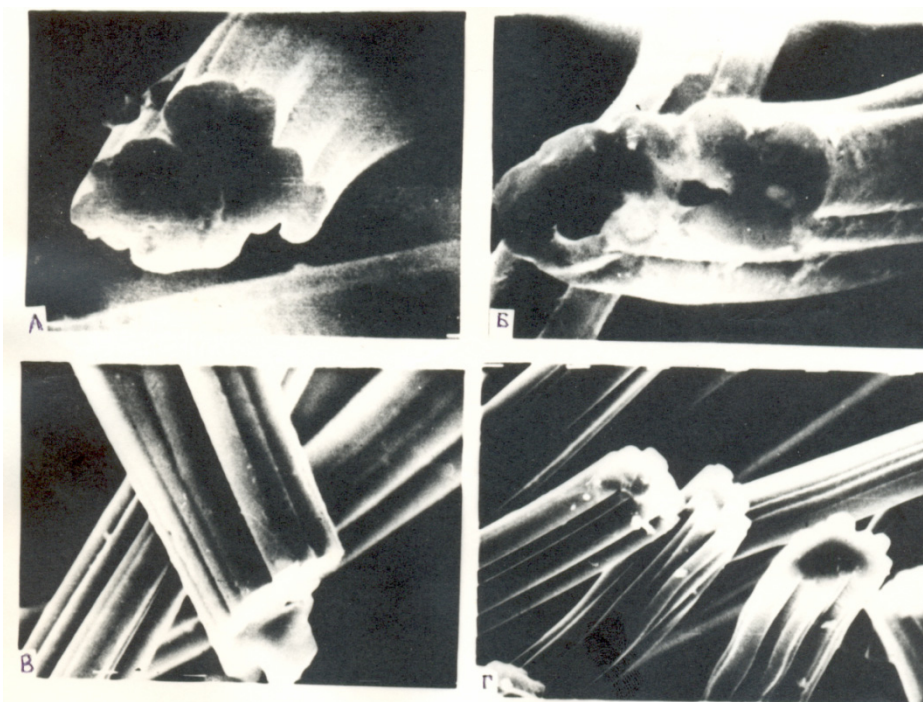


Рис. 4. Образцы УВМ: А – НТМ-200 ($\times 2000$); Б – ВВП-66-95 ($\times 2000$); В – углен ($\times 3500$); Г – грален ($\times 5000$)

Значения реакционной поверхности тканых материалов, определенные электрохимическим методом, как видно из табл. 1 и 2, в несколько раз меньше, чем определенные весовым методом (исходя из суммарной поверхности цилиндрических волокон, составляющих материал). Это, видимо, связано с тем, что электрохимический процесс осуществляется не по всей толщине жгута, составляющего материал. Результаты электронно-микроскопических исследований показывают, что металл проникает на некоторую глубину внутрь жгута, не осаждаясь по всему объему. Расчеты реакционной поверхности УВМ, выполненные исходя из суммарной боковой поверхности жгутов, составляющих материал ($S^{\text{ж}}$), показывают, что эта поверхность меньше, чем определенная из электрохимических измерений (см. табл. 1), что также свидетельствует о частичном проникновении электрохимического процесса внутрь жгута [5].

Т а б л и ц а 1

Параметры нетканых углеродных волокнистых материалов

Материал	r , мкм	S_v^B , см ⁻¹	S_M^B , см ² /Г	S_v^3 , см ⁻¹	S_M^3 , см ² /Г	c , См/см	ε	$S_{\text{абс}}$, м ² /Г
ВНГ-50	6,0	250	1900	265	2000	1,3/2,6	0,92	1,9
ВНГ-30	5,5	150	2000	160	2100	0,90/0,33	0,96	4,2
ВИНН-250	4,5	190	3000	280	4700	0,1/0,4	0,97	3,6
НТМ-200	5,0	170	2700	216	3600	0,07/0,4	0,96	22,3
НТМ-100	5,4	170	2400	220	3400	0,03/0,12	0,96	9,9
Мтилон	5,1	240	2640	270	3000	0,13/0,5	0,94	2,4
ВВП-66-95	4,7	225	2800	255	3200	0,006/0,05	0,96	3,0
ФРН	5,0	90	2600	125	4100	0,001/0,005	0,98	—
КНМ	6,1	140	2100	160	2400	0,009/0,03	0,98	13,2
ВИНН-150	5,0	160	2500	220	3750	0,05/0,16	0,92	14,0
КСС	4,5	—	2800	—	2200	0,1/0,2	0,89	—
Углен	5,1	205	2200	240	3000	0,05/0,13	0,95	—
Грален	4,9	215	2300	260	3100	0,1/0,4	0,96	—
НТ-1	6,2	—	—	165	2200	0,001/0,02	0,90	—
НТ-2	6,2	—	—	165	2200	0,003/0,014	0,90	—
АНМ	6,1	135	2150	180	2500	0,01/0,12	0,96	—

Для характеристики трехмерных электродов обычно используют реакционную поверхность, отнесенную к объему электрода. УВМ в промышленных аппаратах для обеспечения надежного контакта с токоподводом сжимают в полтора – два раза, поэтому более корректно оценивать поверхность УВМ, отнесенную к их весу. В табл. 1 и 2 приведены значения реакционных поверхностей УВМ, отнесенные к объему материала в свободном состоянии (S_v^B , S_v^3) и к его весу (S_B^B , S_B^3) [3–6]. Над чертой – значения электропроводности материалов в свободном состоянии, под чертой – при сжатии материала в 2 раза.

Т а б л и ц а 2

Параметры тканых углеродных волокнистых материалов [3, 6]

Материал	r , см ⁻¹	S_M^B , см ² /Г	$S^{\text{ж}}$, см ⁻¹	S_M^3 , см ² /Г	c , См/см	ε	$S_{\text{абс}}$, м ² /Г
ТВШ	4,6	3000	780	1600	0,16/0,4	0,91	2,3
ТГН-2М	5,0	2400	220	600	0,45/1,5	0,85	2,7
ЛВИК-95	6,0	2200	270	900	0,26/0,87	0,83	1,25
ЛГ-50	3,8	3100	150	590	0,02/0,09	0,76	1,2
ЛГ-30	3,7	3200	180	310	0,64/2,1	0,78	2,3
ЛГ-10	3,4	3500	170	220	0,44/1,4	0,77	1,7

Заключение. Правильная оценка реакционной поверхности является важной для объемно-пористых проточных электродов и особенно для электродов, состоящих из частичек малого размера неправильной формы. В литературе для оценки реакционной поверхности такого рода электродов часто пользуются абсорбционными методами.

На примере изученных УВМ нами показано, что поверхность, определенная абсорбционным методом, далеко не соответствует той поверхности, которая участвует в электрохимических реакциях, лимитируемых диффузией. Поэтому производить расчеты и делать выводы о возможности интенсификации процесса электролиза на основании этих данных неверно. Значительные расхождения в значениях поверхностей S^p и $S_{абс}$, например для УВМ, обусловлены тем, что геометрические размеры микропор и микрошероховатостей, поверхность которых учитывается при определениях абсорбционным методом, намного меньше толщины диффузионного слоя. Следовательно, для процессов, контролируемых диффузией, эта поверхность в реакции не участвует и способствовать интенсификации процесса не может.

Проведенные исследования показали, что поверхность волокон нетканых УВМ более доступна для электрохимических процессов, контролируемых диффузией и связанных с осаждением металлов, чем поверхность волокон, составляющих тканые УВМ. Поэтому реакционная поверхность нетканых УВМ значительно больше реакционной поверхности тканых УВМ.

Список литературы

1. Конкин, А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы / А.А. Конкин. – Минск : Наука и техника, 1982. – 272 с.
2. Фиалков, А.С. Углерод. Межслоевые соединения и композиты на его основе / А.С. Фиалков. – Москва : Аспект-Пресс, 1997. – 718 с.
3. Варенцов, В.К. Использование проточных объемно-пористых катодов для интенсификации электрохимических процессов в гидрометаллургии / В.К. Варенцов // Интенсификация электрохимических процессов : сб. науч. тр. – Москва : Наука, 1988. – С. 94–118.
4. Варенцов, В.К. Электрохимические реакторы с УВЭ: разработка и использование / В.К. Варенцов // Химия в интересах устойчивого развития. – 1997. – № 2. – С. 147–156.
5. Варенцов, В.К. Углеродные волокнистые материалы – новые электроды для извлечения металлов из разбавленных растворов. 1. Нетканые материалы / В.К. Варенцов, А.Ф. Жеребилов, М.Д. Малей // Известия СО АН СССР. Сер. химических наук. – 1984. – № 17, вып. 6. – С. 120–127.
6. Жеребилов, А.Ф. Углеродные волокнистые материалы – новые электроды для извлечения металлов из растворов. 2. Тканые углеродные материалы / А.Ф. Жеребилов, В. К. Варенцов // Известия СО АН СССР. Сер. химических наук. – 1987. – № 2, вып. 1. – С. 110–115.

References

1. Konkin, A.A. Carbon and other heat-resistant fibrous materials / A.A. Konkin. – Minsk : Science and Technology, 1982. – 272 p.
2. Fialkov, A.S. Carbon. Interlayer joints and composites based on it / A.S. Fialkov. – Moscow : Aspect-Press, 1997. – 718 p.
3. Varentsov, V.K. Use of flow-through volume-porous cathodes for intensification of electrochemical processes in hydrometallurgy / V.K. Varentsov // Intensification of electrochemical processes: collection of scientific papers. – Moscow : Science, 1988. – P. 94–118.
4. Varentsov, V.K. Electrochemical reactors with CFE: development and use / V.K. Varentsov // Chemistry for Sustainable Development. – 1997. – No. 2. – P. 147–156.
5. Varentsov, V.K. Carbon-graphite fibrous materials – new electrodes for extracting metals from dilute solutions. 1. Non-woven materials / V.K. Varentsov, A.F. Zherebilov,

M.D. Maley // Bulletin of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Series of Chemical Sciences. – 1984. – No. 17, issue 6. – P. 120–127.

6. Zherebilov, A.F. Carbon fibrous materials – new electrodes for extracting metals from solutions. 2. Woven carbon materials / A.F. Zherebilov, V.K. Varentsov // Bulletin of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Series of Chemical Sciences. – 1987. – No. 2, issue 1. – P. 110–115.

УДК 691

DOI 10.54734/20722958_2025_2_99

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

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

E-mail: moskva_in@mail.ru

Белякова Елена Александровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Кадастр недвижимости и право»
E-mail: var_lena@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

Moskvin Roman Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Operation of Automobile Transport»

E-mail: moskva_in@mail.ru

Belyakova Elena Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Real Estate Cadastre and Right»
E-mail: var_lena@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ КАУСТИФИКАЦИИ АКТИВИЗАТОРОВ В КОМПОЗИТЕ И ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ МИНЕРАЛЬНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ

Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова

Представлен замкнутый процесс утилизации углекислого газа при производстве щелочного активатора геошлаковых и геосинтетических композитов. Рассмотрены и теоретически обоснованы соединения, которые могут быть компонентами-активаторами каустификационного твердения минерально-шлаковых вяжущих. Показано, что наибольший выход щелочей получается при каустификации фторидов натрия и калия; высокие выходы щелочей имеют сода и поташ. Выявлено, что предпочтительным активатором твердения каустифицированных вяжущих является известково-содовый активатор, его применение позволило получить минеральные композиты с прочностью до 50 МПа.

Ключевые слова: композиты, каустификация активаторов, особенности, прочность, формирование, минерально-шлаковое вяжущее

FEATURES OF CAUSTICATION PROCESSES OF ACTIVATORS IN COMPOSITE AND STRENGTH FORMATION OF MINERAL SLAG BINDERS

R.N. Moskvina, E.A. Belyakova

A closed process of carbon dioxide utilization in the production of alkaline activator for geoslag and geosynthetic composites is presented. Compounds that can be components-activators of causticization hardening of mineral-slag binders are considered and theoretically substantiated. It is shown that the highest yield of alkalis is obtained during causticization of sodium and potassium fluorides; soda and potash have high yields of alkalis. The most preferable activator of causticized binders hardening is lime-soda activator; its use made it possible to obtain mineral composites with a strength of up to 50 MPa.

Keywords: composites, causticization of activators, peculiarities, strength, formation, mineral-shake binder

Вяжущие вещества, в частности минерально-шлаковые вяжущие (МШВ), геошлаковые вяжущие (геополимеры), отверждаемые каустифицируемыми в теле бетона активаторами – содой или поташом с известью, представляют значительный интерес для научных исследований в области строительного материаловедения.

Именно комбинация соды (поташа) и извести должна получить статус щелочного активизатора геошлаковых и геосинтетических композитов [1, 2]. Для превращения соды или поташа в щелочь необходима известь. Производство извести связано с выделением углекислого газа. Для производства соды аммиачным способом по рециркуляционной технологии с возвратом аммиака в цикл производства необходимы углекислый газ и поваренная соль. Таким образом, известь при создании геосинтетических вяжущих приобретает роль чрезвычайно важного компонента, регенерирующего щелочи NaOH и KOH из соды или поташа. Замкнутый процесс утилизации углекислого газа, производства соды и известково-содового активизатора МШВ является экологически безопасным и может быть положен в основу создания новых материалов и улучшения геоэкологии (рис. 1). Других вариантов масштабного безобжигового, малоэнергоёмкого использования отходов горных пород пока не предвидится.

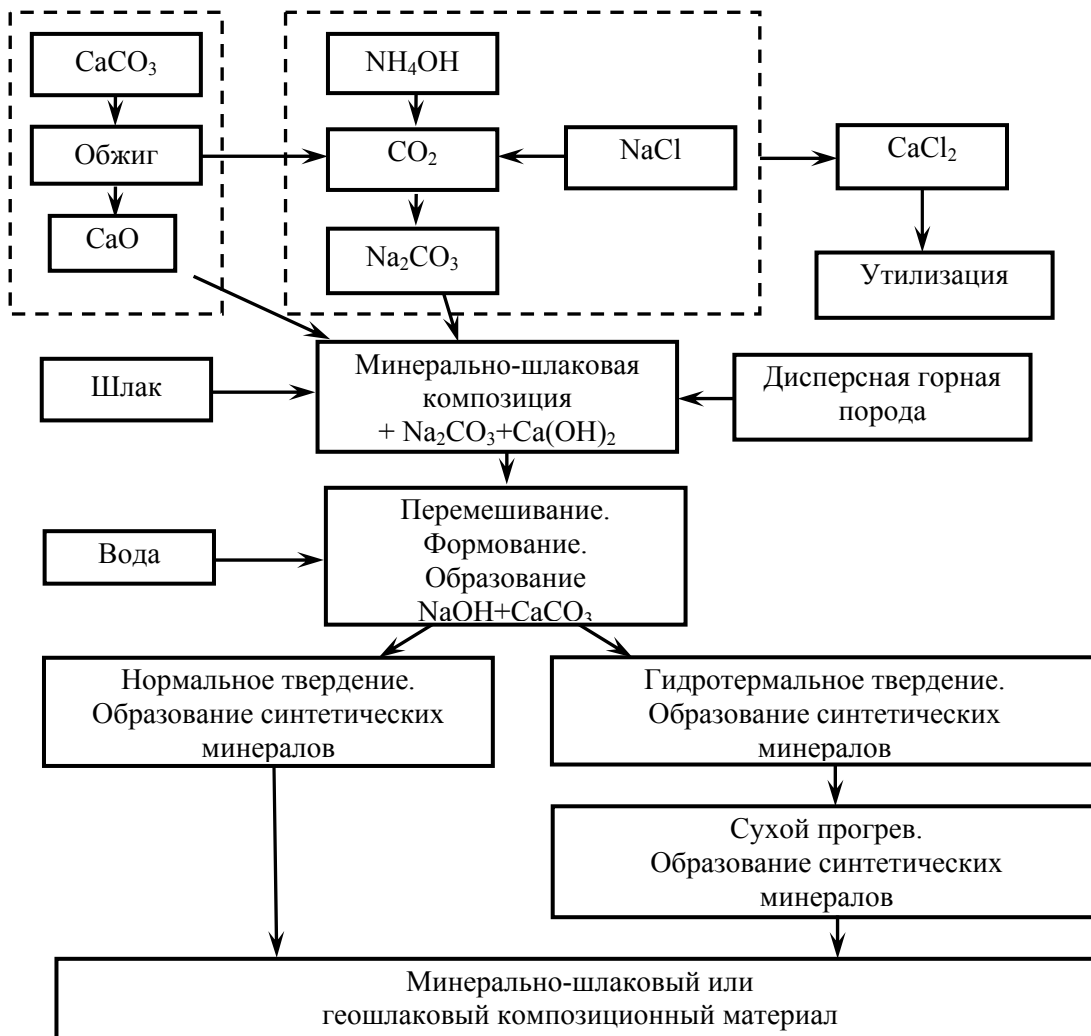


Рис. 1. Схема замкнутого процесса утилизации углекислого газа, производства соды и содоизвесткового активизатора минерально-шлаковых вяжущих

В процессе регенерации щелочи из соды и поташа образуется кальциевая соль угольной кислоты – кальцит CaCO_3 . Образование побочной соли наиболее благоприятно для формирования прочности карбонатно-шлаковых вяжущих. В этом случае образующийся кальцит кристаллизуется на кристаллах исходной карбонатной породы. Для геосинтетических материалов минеральная порода выбирается с учетом реакционной активности по отношению к щелочам. Если в качестве каустифицируемого соединения берется другое Na- и K-содержащее вещество, то наряду с NaOH и KOH образуется нерастворимая соль, молекулярно-распределенная в теле композита. Присутствие соли может оказывать различное влияние на формируемую под

действием щелочей прочность композита. Она может заметно не влиять на прочность композита, понижать или повышать ее.

В табл. 1 представлены лишь 13 соединений, которые могут быть компонентами реакции каустификации. Наиболее доступные из них – сода и поташ, однако некоторые могут быть побочными продуктами отдельных производств ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, NaF , Na_2HPO_4 и др). Наибольший выход щелочей (0,95 и 0,97 г/г) получается при каустификации фторида натрия и калия. В этом случае при реакции получается наименьшее количество образующейся примесной соли. Высокие выходы щелочей имеют сода и поташ.

Т а б л и ц а 1

Каустифицируемые вещества

Каустифицируемые вещества	Формула	Молекулярная масса	Реакционный процесс каустификации	Кол-во активизатора в г/г $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Выход NaOH в г/г активизатора
Углекислый натрий, калий	Na_2CO_3	106	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3 + 2\text{NaOH}$	1,43	0,75
	K_2CO_3	138	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3 + 2\text{KOH}$	1,86	0,81
Тетрагидроксо-алюминат натрия	$\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$	118	$2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}[\text{Al}(\text{OH})_4]_2 + 2\text{NaOH}$	3,20	0,34
Тетраборат натрия	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	202	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaB}_4\text{O}_7 + 2\text{NaOH}$	2,73	0,40
Фториды натрия, калия	NaF	42	$2\text{NaF} + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaF}_2 + 2\text{NaOH}$	1,05	0,95
	KF	58	$2\text{KF} + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaF}_2 + 2\text{KOH}$	1,57	0,97
Фосфаты натрия, калия	Na_3PO_4	164	$2\text{Na}_3\text{PO}_4 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 6\text{NaOH}$	1,48	0,73
	K_3PO_4	212	$2\text{K}_3\text{PO}_4 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 6\text{KOH}$	1,91	0,79
Гидроортофосфаты натрия, калия	NaH_2PO_4	120	$2\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + 2\text{NaOH}$	3,24	0,33
	KH_2PO_4	136	$2\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + 2\text{KOH}$	3,68	0,41
	Na_2HPO_4	142	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaHPO}_4 + 2\text{NaOH}$	1,92	0,56
	K_2HPO_4	158	$\text{K}_2\text{HPO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaHPO}_4 + 2\text{KOH}$	2,14	0,71
Натрий, калий углекислый	$\text{KNaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	230	$\text{KNaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3 + \text{NaOH} + \text{KOH} + 6\text{H}_2\text{O}$	3,11	0,46

Для экспериментального выявления эффективного активизатора каустификационного твердения МШВ были выбраны: углекислый натрий, гидроортофосфат натрия и фторид натрия. Для протекания реакции каустификации в состав МШВ вводилось определенное количество гидратной извести. Количество активизаторов бралось стехиометрически, исходя из условия получения по реакции каустификации одинакового количества щелочи NaOH , которое составляло 1,5–1,6 % от массы МШВ. В качестве минеральной составляющей МШВ использовали инертную по отношению к щелочи породу – мрамор. Соотношение мрамор : шлак в мраморно-шлаковом композите было 2:3 по массе. Изготавливались образцы-кубы с ребром 3 см методом силового прессования при давлении 25 МПа и влажности сырьевой смеси 10,5 %. Отформованные образцы твердели в нормально-влажностных условиях и испытывались в заданные сроки. Результаты представлены на рис. 2.

Наибольшую прочность на 28-е сутки твердения показали образцы, активизированные гидроортофосфатом натрия. Однако в начальные сроки твердения наблюдался незначительный прирост прочности (на 3-и и 7-е сутки твердения 3,2 МПа и 12,4 МПа соответственно, что составляет 5 % и 19 % от 28-суточной прочности). Также низкую прочность в первые сутки твердения показали образцы с содой, что можно объяснить отсутствием добавочной для каустификации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и медленным выделением гидролизной извести при гидратации шлака.

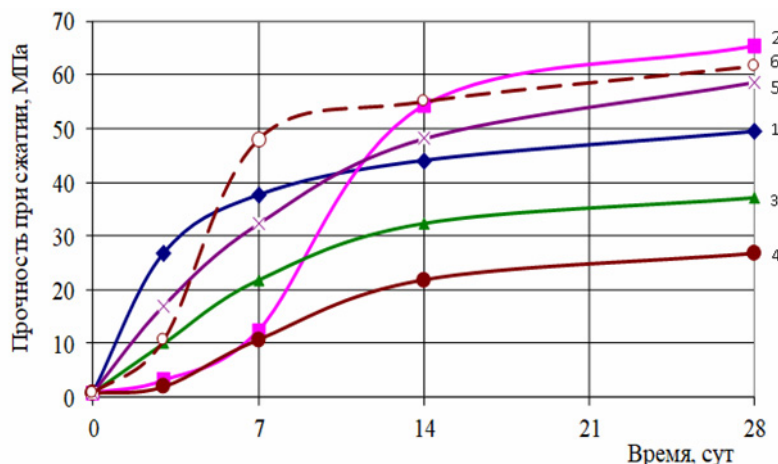


Рис. 2. Кинетика твердения каустифицированных мраморно-шлаковых композитов на различных активизаторах:

- 1 – Na_2CO_3 – 2 % + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 3 %; 2 – Na_2HPO_4 – 2,8 % + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 3 %;
 3 – NaF – 1,7 % + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 3 %; 4 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 5 %;
 5 – Na_2HPO_4 – 1,4 % + Na_2CO_3 – 1 % + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 3 %; 6 – Na_2CO_3 – 2 %

Применение смеси таких активизаторов, как углекислый натрий и гидроортофосфат натрия, позволило сочетать их положительные стороны: ускоренный набор прочности в ранние сроки твердения одного и высокую прочность в 28-суточном возрасте другого.

Как показал проведенный эксперимент, предпочтительным активизатором твердения каустифицированных вяжущих является известково-содовый, так как у него наблюдается хорошая динамика роста прочности в первые сроки твердения (на 3-и и 7-е сутки твердения 3,2 МПа и 12,4 МПа соответственно, что составляет 55 % и 78 % от 28-суточной прочности, которая составляет 49,4 МПа), а также сода отличается широкой распространенностью по сравнению с другими активизаторами.

Результаты произведенного термодинамического расчета ΔG°_T при температуре 298 К предполагаемых реакций в карбонатных системах приведены в табл. 2. Отрицательное значение изобарно-изотермического потенциала реакции ΔG°_{298} свидетельствует о протекании реакции в прямом направлении [3].

Т а б л и ц а 2

Показатели изобарно-изотермического потенциала в протекающих реакциях

Формула реакции	Изобарно-изотермический потенциал ΔG°_{298} , ккал/моль (кДж/моль)
$\text{CaCO}_3 + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$	+14,75 (61,66)
$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3 + 2\text{NaOH}$	-14,75 (-61,66)
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{K}_2\text{CO}_3 = \text{CaCO}_3 + 2\text{KOH}$	-19,05 (-79,63)
$\text{CaCO}_3 + 2\text{KOH} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{K}_2\text{CO}_3$	+19,05 (79,63)

П р и м е ч а н и е. Энергия Гиббса ($-G^\circ_{298}$, ккал/моль) используется для расчета изобарно-изотермического потенциала для: NaOH – 90,1; Na_2CO_3 – 250,4; CaCO_3 (кальцит) – 269,78; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 214,33; KOH – 89,5№; K_2CO_3 – 53,50.

Как показал термодинамический анализ реакций, в прямом направлении протекают интересующие нас реакции каустификации в результате взаимодействия извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с карбонатами К и Na с выделением щелочей NaOH и KOH и кальцита.

Проведенный количественный химический анализ подтвердил быстрое протекание реакции каустификации между содой и известью в водном растворе. Установлены кинетика и сроки протекания реакционно-химического процесса. Время полного протекания реакции каустификации 1-молярного раствора соды при 20°C составляет 30 мин, в течение которого образуется 94,9 % CaCO_3 . Скорость реакционно-химического процесса велика и составляет 0,0187 моль·л/мин. При 50°C за 30 мин образуется 99,9 % CaCO_3 , и скорость реакционно-химического процесса составляет 0,0188 моль·л/мин; константа равновесия $K_p=1,02 \cdot 10^8$. Разница между скоростями реакций при 20°C и 50°C незначительна, отношение скоростей равно 1,005.

В ы в о д ы :

1. Рассмотренные реакции каустификации целого ряда водорастворимых щелочных солей Na и K известью с регенерацией щелочей в теле бетона открывают возможности расширения номенклатуры активизирующих добавок, в том числе из отходов производства, улучшения санитарно-гигиенических условий изготовления бетонов, получения сухих строительных смесей, повышения экономических показателей.

2. Различные водорастворимые соли Na и K, вводимые в качестве активизаторов в смеси с известью и регенерирующие в теле бетона одинаковое количество NaOH, по-разному влияют на скорость набора прочности и ее нормативные значения. Введение смеси солей может быть важным фактором ускорения начальной прочности минерально-шлаковых композитов.

3. Скорость каустификационного процесса, с регенерацией щелочи в теле бетона, при использовании соды и некоторых других щелочных активизаторов достаточно высока, что подтверждается быстрым нарастанием прочности и временем протекания реакционно-химического процесса каустификации 1-молярного раствора соды и извести в жидкой фазе: при 20°C за 30 минут проходит 95 % всего процесса, а константа равновесия $K_p=1,02 \cdot 10^8$.

4. Предпочтительным активизатором твердения каустифицированных вяжущих является известково-содовый активизатор. Его применение позволило получить минеральные композиты с прочностью до 50 МПа.

Список литературы

1. Калашников, В.И. Перспективы развития геополлимерных вяжущих. Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения / В.И. Калашников // Материалы VIII Академических чтений РААСН. – Самара, 2004. – С.193–195.
2. Калашников, В.И. Модификация минеральных композиций активизаторами твердения и пластифицирующими добавками / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, Н.И. Макридин, А.А. Карташов, Р.Н. Москвин, Р.В. Тарасов, А.А. Краснощеков // Современные проблемы строительного материаловедения : материалы Седьмых Академических чтений РААСН. Часть 1. – Белгород, 2001. – С. 183–190.
3. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.М. Мchedлов-Петросян. – Москва : Стройиздат, 1986. – 408 с.
4. Тараканов, О.В. Оценка влияния карбонатного микронаполнителя на кинетику начального структурообразования и состав гидратных фаз цементных систем / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, Е.А. Белякова, К.А. Стешкина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 40–46.

References

1. Kalashnikov V.I. Prospects for the Development of Geopolymer Binders. Current State and Prospects for the Development of Construction Materials Science / V.I. Kalashnikov // Proceedings of the VIII Academic Readings of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. – Samara, 2004. – P. 193–195.
2. Kalashnikov, V.I. Modification of mineral compositions with hardening activators and plasticizing additives / V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, N.I. Makridin, A.A. Kartashov, R.N. Moskvina, R.V. Tarasov, A.A. Krasnoshechekov // Modern problems of building materials science. Proceedings of the seventh academic readings of RAASN. Part 1. – Belgorod, 2001. – P. 183–190.
3. Babushkin, V.I. Thermodynamics of silicates. / V.I. Babushkin, G.M. Matveev, O.M. Mchedlov-Petrosyan. – Moscow : Stroyizdat, 1986. – 408 p.
4. Tarakanov, O.V. Evaluation of the influence of carbonate microfiller on the kinetics of initial structure formation and the composition of hydrated phases of cement systems / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, K.A. Steshkina // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 2. – P. 40–46.

УДК 666.7

DOI 10.54734/20722958_2025_2_105

*Приволжский государственный
университет путей сообщения*

Россия, 443066, ул. Свободы, д. 2В

Соколова Светлана Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Железнодорожный путь
и строительство»

E-mail: sokolova9967@mail.ru

*Самарский государственный технический
университет*

Россия, 443100, Самара,
ул. Молодогвардейская, д. 244

Сидоренко Юлия Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Производство строительных
материалов, изделий и конструкций»
E-mail: sm-samgasa@mail.ru

Volga State Transport University

Russia, 443066, Samara, 2B, Svobody St.

Sokolova Svetlana Vladimirovna,
Candidate of technical sciences, Associate
Professor of the Department «Railway Track
and Construction»

E-mail: sokolova9967@mail.ru

Samara State Technical University

Russia, 443100, Samara,
244, Molodogvardeyskaya St.

Sidorenko Yulia Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Production of Building
Materials, Products and Structures»
E-mail: sm-samgasa@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.В. Соколова, Ю.В. Сидоренко

В современных условиях важное значение имеет технико-экономическая политика сбережения ресурсов, диктующая необходимость внедрения новых научных идей с целью интенсификации технологий в промышленности. Отдельные виды отходов промышленности (например отвалы шлаки) можно использовать в качестве сырьевых компонентов при производстве строительных материалов специального назначения, в частности для изготовления гипсобетонных панелей и жаростойких бетонов. С этой целью были разработаны составы бетонов, содержащие в качестве добавок отход промышленного производства (отработанный катализатор ИМ-2201) и известь, являющуюся активатором химических процессов.

Ключевые слова: огнеупоры, модификация, термостойкость, отход, жаростойкие бетоны, высокопрочный гипс, отработанный катализатор ИМ-2201, известь

OPTIMIZATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SPECIAL PURPOSE CONCRETES

S.V. Sokolova, Yu.V. Sidorenko

In modern conditions the technical and economic policy of saving resources is important and it dictates the need to use new scientific ideas in order to intensify technologies in industry. Due to waste disposal the cost of building materials is reduced and the environmental situation is improved as a result of slag dumps elimination. Some industrial wastes (e.g. slag dumps) can be used as raw materials for the manufacture of special building materials, in particular for the manufacture of gypsum concrete panels and heat-resistant concrete. For this purpose some compositions of concretes have been developed, which contain industrial waste spent catalyst IM-2201 and lime as additives, which are an activators of chemical processes.

Keywords: refractories, modification, heat resistance, waste, heat-resistant concrete, high-strength gypsum, spent catalyst IM-2201, lime

Введение. Основное направление технологического процесса современного строительства – это применение эффективных строительных материалов, снижение материалоемкости, повышение механизации и индустриализации строительства. Уве-

личение эксплуатационных характеристик изделий, внедрение безотходных технологий в производство, использование отходов промышленных производств, направленные на создание благоприятных условий для сохранения от загрязнений окружающей среды, являются актуальными проблемами в строительном комплексе [1-3].

Бетон как универсальный строительный материал применяется практически во всех областях специального производства. Наиболее доступный материал – это известь (негашёная комовая, известь-пушонка и т.д.), которую в качестве добавки, являющейся активатором химических процессов, можно использовать в жаростойких бетонах и в гипсобетоне с целью защиты арматуры от коррозионных процессов [4].

Теоретический анализ. Как известно, в любом тепловом агрегате одновременно действует ряд факторов, способных вызвать разрушение, и в большинстве своем огнеупоры разрушаются вследствие деформации, растрескивания, разъедания, механических разрушений и т.д. [5–11]. Точные расчеты огнеупорности, основывающиеся на химическом составе весьма затруднительны, так как они исходят из того, что химический состав исследуемого материала точно установлен и все составные части находятся в мелкозернистом состоянии, в тесном смешении, что в действительности не имеет места. Поэтому огнеупорность материалов, как правило, определяется опытным путем.

Что касается бетонов, приготовленных на гипсовом вяжущем (высокопрочном гипсе), то известно, что среда высокопрочного гипса является нейтральной (рН находится в пределах от 7,20 до 7,93), поэтому сталь в нем может подвергаться коррозии, что ведет впоследствии к разрушению конструкции [4].

Экспериментальная часть

Модификация жаростойких композитов с помощью извести

С целью изучения процесса структурной модификации жаростойких бетонов были применены бетоны гидравлического твердения на основе портландцемента, глиноземистого цемента, с добавкой отработанного катализатора ИМ-2201 и с добавкой извести-пушонки, пропитанные ортофосфорной кислотой. Опыты проводили на образцах с размерами 50х50х50 мм, пропитку которых выполняли в естественных условиях ортофосфорной кислотой с концентрацией 10, 20 и 30 % с последующим нагреванием при температуре 850⁰С с выдержкой в течение двух часов.

Составы жаростойких бетонов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Составы испытываемых жаростойких бетонов

№ составов	Исходные сырьевые материалы	Масса, кг/м ³	Масса, %
I	ПЦ-400-Д-20	463	24
	Отработанный катализатор ИМ-2201	205	12
	Шамотный песок	1342	69
II	ПЦ-400-Д-20	441	23
	Отработанный катализатор ИМ-2201	192	9,6
	Шамотный песок	1343	68
	Известь-пушонка (5 %)	35	1,6
III	ПЦ-400-Д-20	423	23
	Отработанный катализатор ИМ-2201	185	7
	Шамотный песок	1344	68
	Известь-пушонка (10 %)	63	4
IV	Глиноземистый цемент	662	34
	Шамотный песок	1342	69
V	Глиноземистый цемент	627	31,4
	Шамотный песок	1342	68
	Известь-пушонка (10 %)	33	1,6
VI	Глиноземистый цемент	602	30
	Шамотный песок	1340	68
	Известь-пушонка (5 %)	63	4

Результаты испытаний образцов по составам приведены на рис. 1.

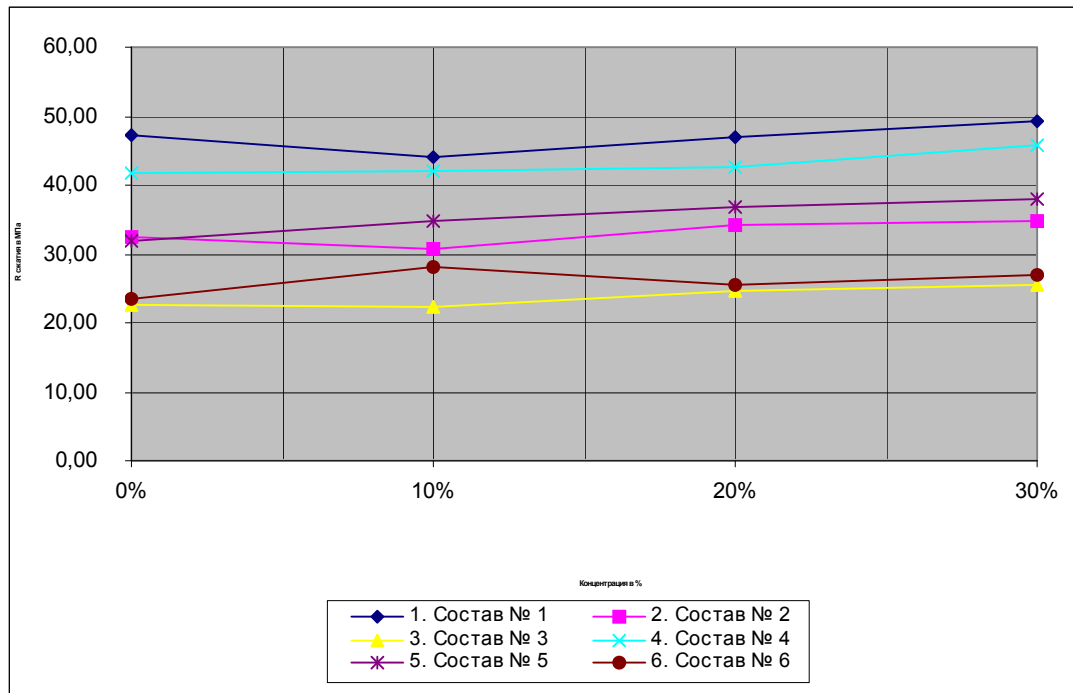


Рис. 1. Зависимость прочности образцов из жаростойкого бетона после обжига (непропитанные и пропитанные) от концентрации H_3PO_4

Как видно из графика на рис. 1, наибольшей прочностью обладают образцы на глиноземистом цементе, в составе которых присутствует известь-пушонка (10 %). Известь-пушонка вводилась в состав бетона в качестве активизатора химических реакций, происходящих с ортофосфорной кислотой, что способствовало проникновению ее на наибольшую глубину.

Предлагается вариант пропитки изделий из жаростойких бетонов на гидравлических вяжущих вначале известковым молоком, а затем фосфатными связующими (рис. 2).

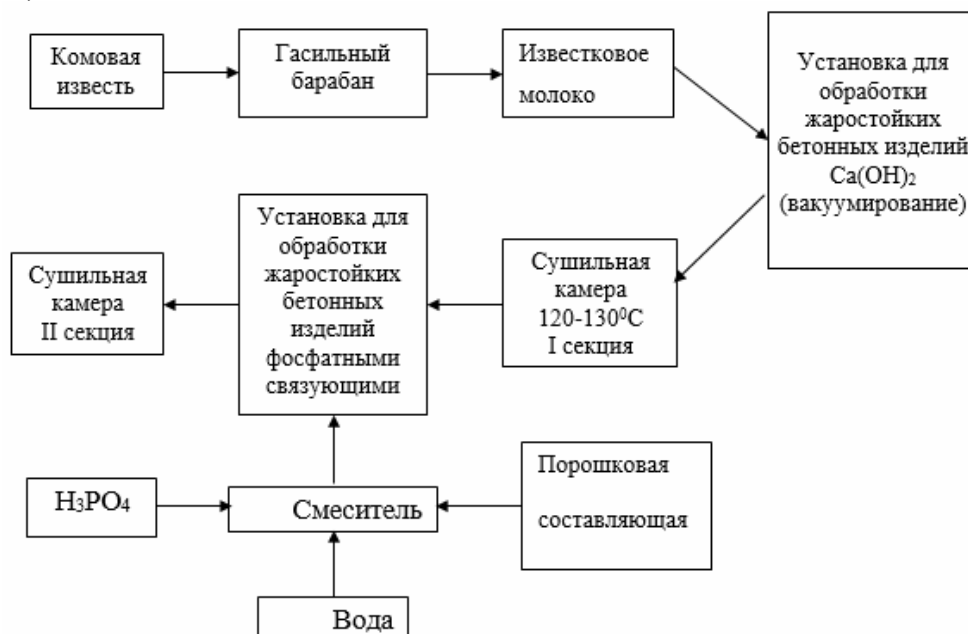


Рис. 2. Технологическая схема структурной модификации жаростойких композитов

Суть данной технологии заключается в том, что сначала осуществляется подача негашеной комовой извести в гасильный барабан с водой, а затем происходят взаимодействие извести CaO с водой («гашение») и образование известкового молока, после чего изделия пропитываются фосфатными связующими.

Модификация гипсобетона с помощью извести

Негашеная молотая известь с содержанием $(\text{CaO} + \text{MgO}) = 80\%$ добавлялась к высокопрочному гипсу в количестве 3; 5 и 10 % от веса гипса.

Для коррозионных испытаний весовым методом изготавливались образцы размером 160х40х40 мм с заложенными в них стальными пластинками 150х35х2 мм. Водогипсовое отношение (В/Г) было принято равным 0,35. Образцы хранились длительное время (до двух лет) в среде с высокой относительной влажностью воздуха ($\phi = 80\%$) и, кроме того, при попеременном увлажнении и высушивании. Образцы подвергались также высушиванию в сушильном шкафу при $t = 55^\circ\text{C}$ и на воздухе при $t = 20^\circ\text{C}$ и $\phi = 50\text{--}60\%$.

Добавка 3 и 5 % негашеной молотой извести оказалась недостаточной для защиты арматуры от коррозии в гипсобетоне, особенно при попеременном увлажнении и высушивании. Добавка же 10 % негашеной молотой извести полностью предохранила арматуру от коррозии: пластинки, извлеченные из образцов в 2-летнем возрасте, имели блестящую поверхность при хранении образцов в условиях высокой влажности.

Измерение pH водных вытяжек из гипсобетона с добавками 5 и 10 % негашеной молотой извести производилось в течение двух лет, начиная с суточного возраста образцов. Хранились образцы в эксикаторах с относительной влажностью воздуха, равной 80 %. Значения pH водных вытяжек из гипсобетона с добавкой негашеной молотой извести представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Значения pH водных вытяжек из гипсобетона с добавкой негашеной молотой извести

№ п/п	Продолжительность хранения образцов в сутках	Добавка извести (%)	
		5	10
1	1	11,15	12,25
2	7	11,82	12,26
3	30	12,06	12,67
4	90	12,05	12,65
5	180	12,04	12,50
6	365 (1 год)	12,00	12,50
7	730 (2 года)	11,73	12,42

Из данных табл. 2 видно, что с добавкой негашеной молотой извести pH гипса значительно повышается, особенно при 10 %-й добавке. При добавке 10 % негашеной молотой извести даже после двухгодичного хранения pH составляет 12,42; pH гипса с добавкой 5 % негашеной молотой извести ниже, чем с добавкой 10 %, и через два года составляет 11,74.

В обычном тяжелом бетоне $\text{pH} \sim 12\text{--}13$. Этот щелочной раствор при соприкосновении с поверхностью арматуры в присутствии кислорода воздуха способен в значительной мере пассивировать ее, затрудняя процесс коррозии.

Поскольку при добавке к высокопрочному гипсу 10 % негашеной молотой извести среда становится щелочной, то условия службы арматуры в гипсе будут приближаться к условиям службы ее в обычном тяжелом бетоне.

Проводилось измерение электродных потенциалов с помощью лабораторного pH-метра ЛПУ-01 и трехконтурного прецизионного потенциометрического стола типа УПК. Измерение электродных потенциалов стали в высокопрочном гипсе с добавкой 10 % извести показало (рис. 3), что потенциалы в этом случае значительно положительнее, чем в чистом высокопрочном гипсе (+ 50 мВ против -500 мВ).

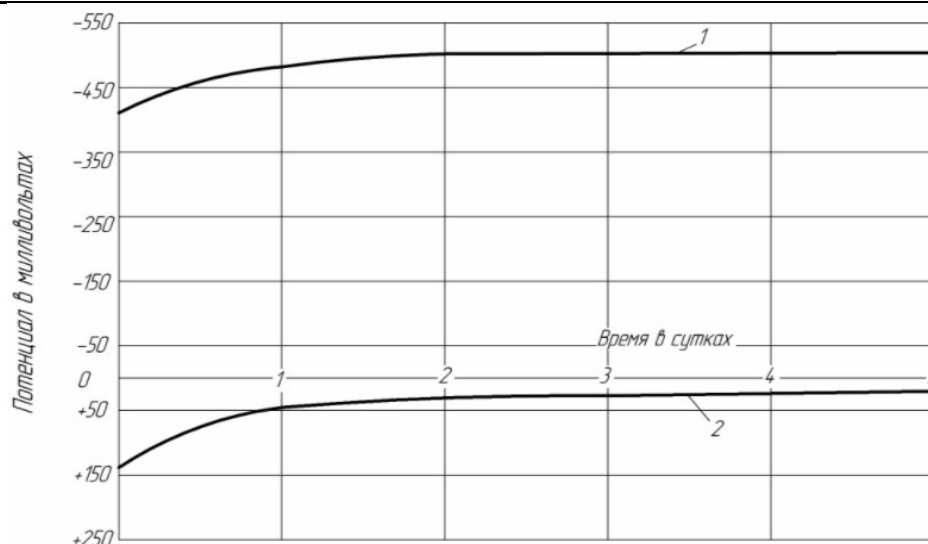


Рис. 3. Кинетика измерения потенциалов стали в образцах из высокопрочного гипса (1) и высокопрочного гипса с добавкой 10 % негашеной молотой извести (2)

Стальная арматура в бетоне находится в пассивном состоянии под действием насыщенного раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при установившемся потенциале, равном 100-150 мВ, по отношению к насыщенному каломельному электроду. Значения потенциалов стали в высокопрочном гипсе с известью приближаются к значениям потенциалов стали в бетонах, что соответствует пассивации стали в высокопрочном гипсе с добавкой извести [4].

Также изготавливались гипсовые образцы с добавкой 10 % извести, в которые закладывались стальные электроды. Водогипсовое отношение равнялось 0,35. Образцы хранились при относительной влажности, равной 80 %, и при попеременном увлажнении и высушивании.

На рис. 4 представлены поляризационные кривые стали в высокопрочном гипсе с добавкой 10 % извести; также для сравнения представлены поляризационные кривые стали в высокопрочном гипсе без добавок (рис. 5, 6 и 7).

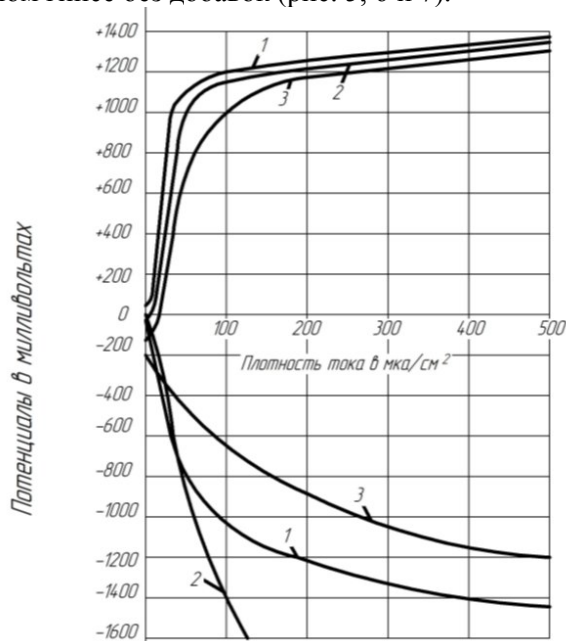


Рис. 4. Поляризационные кривые стали в гипсе с добавкой 10 % негашеной извести:
1 – через сутки после изготовления образцов; 2 – через 6 месяцев хранения образцов при $\phi = 80\%$;
3 – через 3 месяца хранения образцов при попеременном увлажнении и высушивании

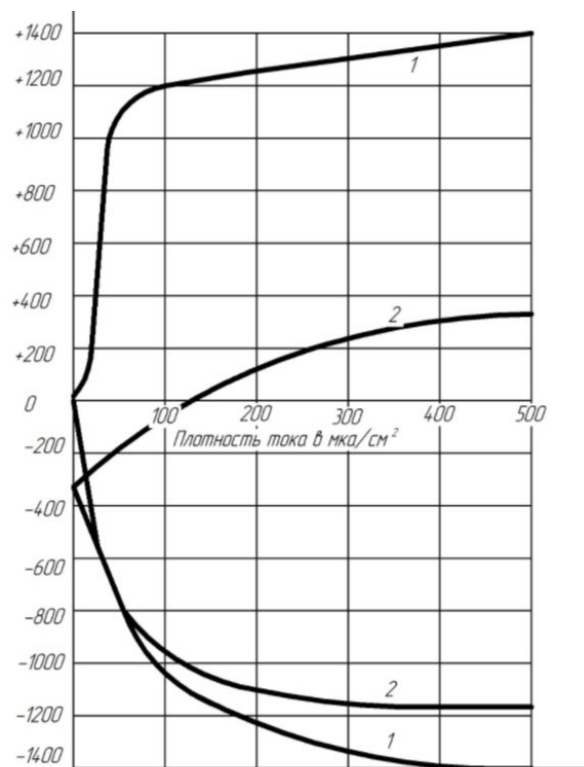


Рис. 5. Поляризационные кривые стали в гипсе с добавкой 10 % негашеной извести (1) и без добавок (2) через сутки после изготовления образцов

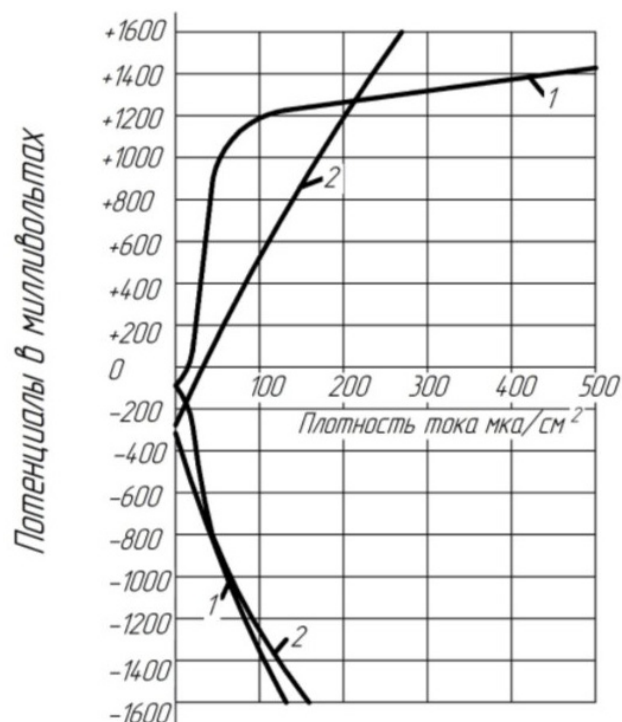


Рис. 6. Поляризационные кривые стали в гипсе с добавкой 10 % негашеной извести (1) и без добавок (2) через 6 месяцев хранения при $\phi = 80\%$

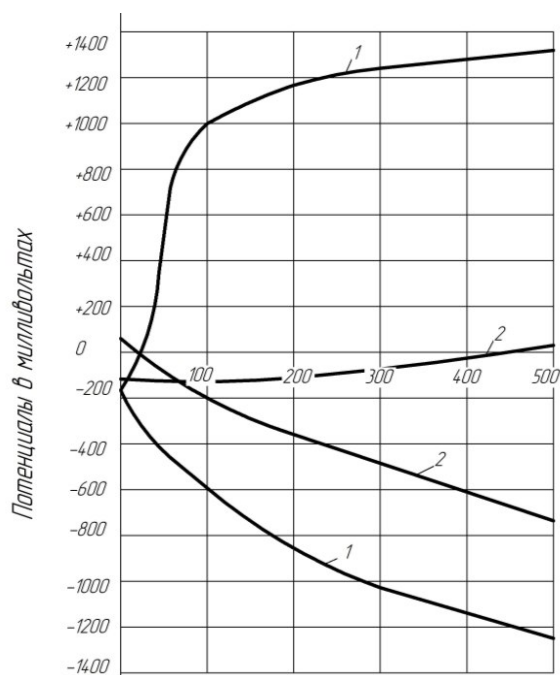


Рис. 7. Поляризационные кривые стали в гипсе с добавкой 10 % негашеной извести (1) и без добавок (2) через 3 месяца хранения при попеременном увлажнении и высушивании

Из данных на рис. 4-7 видно, что анодные кривые стали в высокопрочном гипсе с добавкой 10 % негашеной молотой извести круто поднимаются вверх, происходит резкое возрастание потенциала.

Для изучения зависимости прочности гипсобетона на высокопрочном гипсе от добавки извести негашеной молотой изготавливались образцы-кубы с ребром 7 см из чистого высокопрочного гипса и высокопрочного гипса с добавкой 5 и 10 % извести. Для всех образцов было принято $V/G = 0,35$. Образцы высушивались до наименьшего веса, затем подвергались испытаниям на сжатие.

Испытания показали следующие результаты:

- высокопрочный гипс – 353 кг/см^2 ;
- высокопрочный гипс + 5 % извести – 345 кг/см^2 ;
- высокопрочный гипс + 10 % извести – 384 кг/см^2 .

Как видно из приведенных данных, добавка 10 % извести увеличивает прочность гипса, что происходит, по-видимому, за счет уплотнения образцов в результате гидратационного твердения извести в гипсовом образце.

Испытания на сцепление арматуры в гипсобетоне с добавкой негашеной молотой извести к высокопрочному гипсу показали, что она не уменьшает сцепление гипсобетона с арматурой.

Выводы:

1. С целью повышения физико-механических показателей и долговечности специальных бетонов – жаростойких бетонов и гипсобетонов для изготовления конструктивных изделий – было изучено влияние извести в качестве модифицирующей добавки.

2. С целью осуществления структурной модификации жаростойкого бетона были изготовлены образцы на различных видах вяжущего: на портландцементе и глиноземистом цементе.

3. В качестве добавок использовались отход промышленного производства (отработанный катализатор ИМ-2201) и известь-пушонка.

4. В качестве модифицирующей добавки, играющей роль активатора химических процессов и повышающей прочностные показатели бетона, вводилась известь-пушонка в количестве 5 и 10 %.

5. Наилучшие показатели оказались у образцов на глиноземистом цементе, в составе которых присутствует известь-пушонка (10 %).
6. Предложена технология пропитки жаростойких бетонов путем использования негашеной извести, которая впоследствии претерпевает процесс гашения с образованием «известкового молока», после чего изделия пропитываются фосфатными связующими.
7. С целью предохранения арматуры в гипсобетоне и повышения его прочностных показателей вводилась добавка к высокопрочному гипсу негашеной молотой извести в количестве 10 %.
8. При добавке к высокопрочному гипсу извести нейтральная среда гипса превращается в щелочную ($\text{pH} \sim 12,5$).
9. Щелочная среда высокопрочного гипса с добавкой извести способствует образованию на поверхности арматуры плотной защитной пленки из Fe_2O_3 , которая препятствует переходу ион-атомов металла в раствор и тем самым затрудняет анодный процесс растворения металла.
10. Добавка 10 % негашеной молотой извести к высокопрочному гипсу предохраняет арматуру от коррозии, не ухудшает его сцепления с арматурой и увеличивает прочность гипсобетона.
11. Таким образом, известь в качестве модифицирующей добавки в специальные бетоны является эффективным компонентом в решении проблем долговечности строительных изделий и конструкций.

Список литературы

1. Соколова, С.В. Перспективы применения промышленных отходов для повышения долговечности и огнеупорности жаростойких бетонов / С.В. Соколова, М.Н. Баранова, Д.И. Васильева [и др.] // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 2 (106). – С. 123–133. – URL: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-123-133>
2. Соколова, С.В. Ремонт футеровок тепловых агрегатов жаростойкими композитами с помощью пропиточно-обмазочных технологий на основе отходов промышленных производств / С.В. Соколова, Ю.А. Холопов, Ю.В. Сидоренко // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1 (58). – С. 4–11. – URL: https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_4
3. Хафизова, Э.Н. Применение технологических отходов дробления горных пород при разработке составов цементных бетонов / Э.Н. Хафизова, Ю.Ф. Панченко, Д.А. Панченко // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 6. – С. 790–799. – URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>
4. Передерий, И.А. Исследование коррозии стали в гипсобетоне на высокопрочном гипсе и электрохимическая защита / И.А. Передерий, В.П. Федоров // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1967. – № 3. – С. 20–25.
5. Chen, K. Microstructures and mechanical properties of sodium- silicate-activated slag/co-fired fly ash cementless composites / K. Chen, W.-T. Lin, W. Liu // J. Clean. Prod. – 2020. – Vol. 277. – P. 124025. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124025>
6. Panda, B. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction / B. Panda, J.H. Lim, M.J. Tan // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 165. – P. 563–571. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.040>
7. Estokova, A. Investigation of concrete made with various wastes subjected to sulfuric acid attack / A. Estokova, M. Smolakova // Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS. – 2018. – No. 17. – P. 24–30. – URL: <https://doi.org/10.13167/2018.17.3>
8. Abyzov, V. Refractory concretes with additives of fine-milled high-alumina industrial waste / V. Abyzov, V. Kononova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 451. – P. 012040. – URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012040>
9. Chen, Y. Limestone and calcined clay-based sustainable cementitious materials for 3D concrete printing: a fundamental study of extrudability and early-age strength development /

Y. Chen [et al.] // Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9 (9). – P.1809. – URL: <https://doi.org/10.3390/app9091809>.

10. Chang, Sun. Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar / Chang Sun, Lulu Chen, Jianzhuang Xiao, Amardeep Singh, Jiahao Zeng, // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 170. – P. 105561. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561>.

11. Соколова, С.В. Получение эффективных материалов на основе отходов сернокислотной промышленности / С.В. Соколова, Ю.В. Сидоренко // Вестник НИЦ Строительство. – 2024. – № 2 (41). – С. 131–147. – URL: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-131-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-131-147).

References

1. Sokolova, S.V. Prospects for the use of industrial waste to increase the durability and fire resistance of heat-resistant concrete / S.V. Sokolova, M.N. Baranova, D.I. Vasilyeva [et al.] // Construction and reconstruction. – 2023. – No. 2 (106). – P. 123–133. – URL: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-123-133>

2. Sokolova, S.V., Repair of linings of thermal units with heat-resistant composites using impregnation and coating technologies based on industrial waste / S.V. Sokolova, Yu.A. Kholopov, Yu.V. Sidorenko // Regional architecture and construction. – 2024. – No. 1 (58). – P. 4–11. – URL: https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_4

3. Khafizova, E.N. Use of rock crushing technological wastes for cement concrete compositions / E.N. Khafizova, I.F. Panchenko, D.A. Panchenko // Vestnik SibADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal]. – 2021. – No. 18 (6). – P. 790–799.

4. Perederij I.A. The study of steel corrosion in gypsum concrete on high – strength gypsum and electrochemical protection / I.A. Perederij, V.P. Fedorov // News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture. – 1967. – No. 3. – P. 20–25.

5. Chen, K. Microstructures and mechanical properties of sodium- silicate-activated slag/co-fired fly ash cementless composites / K. Chen, W.-T. Lin, W. Liu // J. Clean. Prod. – 2020. – Vol. 277. – P. 124025. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124025>

6. Panda, B. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction / B. Panda, J.H. Lim, M.J. Tan // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 165. – P. 563–571. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.040>

7. Estokova, A. Investigation of concrete made with various wastes subjected to sulfuric acid attack / A. Estokova, M. Smolakova // Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS. – 2018. – No. 17. – P. 24–30. – URL: <https://doi.org/10.13167/2018.17.3>

8. Abyzov, V. Refractory concretes with additives of fine-milled high-alumina industrial waste / V. Abyzov, V. Kononova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 451. – P. 012040. – URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012040>

9. Chen, Y. Limestone and calcined clay-based sustainable cementitious materials for 3D concrete printing: a fundamental study of extrudability and early-age strength development / Y. Chen [et al.] // Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9 (9). – P.1809. – URL: <https://doi.org/10.3390/app9091809>

10. Chang, Sun. Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar / Chang Sun, Lulu Chen, Jianzhuang Xiao, Amardeep Singh, Jiahao Zeng, // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 170. – P. 105561. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561>

11. Sokolova, S.V. Obtaining effective materials based on waste from the sulfuric acid industry, / S.V. Sokolova, Yu.V. Sidorenko // Bulletin of the Scientific Research Center Construction. – 2024. – No. 2 (41). – P. 131– 147. – URL: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-131-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-131-147).

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69

DOI 10.54734/20722958_2025_2_114

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

Республика Мордовия, 430005, г. Саранск,
Большевикская, д. 68

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

Бабушкина Дельмира Рафиковна,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Архипов Игорь Владимирович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: arhipov_igor2000@list.ru

Бусаргин Дмитрий Александрович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: busargin20@mail.ru

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

Republic of Mordovia, 430005, Saransk,
68, Bolshevikskaya

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

Babushkina Delmira Rafikovna,
Postgraduate student of the Department
"Building Structures"
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Arhipov Igor Vladimirovich,
Postgraduate of the department "Building
Structures"
E-mail: arhipov_igor2000@list.ru

Busargin Dmitry Aleksandrovich,
Postgraduate of the department "Building
Structures"
E-mail: busargin20@mail.ru

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

В.П. Селяев, Д.Р. Бабушкина, И.В. Архипов, Д.А. Бусаргин

Приведен анализ литературных данных, подтверждающих многомасштабность и инвариантность структуры бетона и древесины. По мнению специалистов, многие строительные материалы имеют грубогетерогенную структуру, которая отличается многомасштабностью, инвариантностью, и поэтому методы классической теории сопротивления материалов не всегда достоверно описывают процесс разрушения изделий из бетона, древесины.

В материалах с грубогетерогенной структурой имеются дефекты, которые начинают развиваться на микроуровне при низком уровне напряжений.

Представленные в статье результаты дают возможность учесть влияние дефектов структуры на процесс разрушения, рассматривать процесс разрушения на разных масштабных уровнях, ввести новое предельное состояние по развитию дефекта структуры в процессе эксплуатации конструкции.

Предложены модели разрушения, определяющие вид механизма разрушения (отрывной или сдвиговой) изделий под действием сжимающих напряжений.

Ключевые слова: разрушение, напряжения, многомасштабность, модель, прочность, бетон, древесина

MECHANICS OF DESTRUCTION OF BUILDING MATERIALS WITH AN HETEROGENEOUS STRUCTURE UNDER THE ACTION OF A COMPRESSIVE LOAD

V.P. Selyaev, D.R. Babushkina, I. V. Arhipov, D.A. Busargin

The article provides an analysis of literature data confirming the multiscale and invariance of concrete and wood structure. According to experts, many building materials have a coarse-heterogeneous structure, which is characterized by its multiscale and invariances, and therefore, the methods of classical theory of material resistance do not always reliably describe the process of concrete and wooden products destruction. In materials with a rough heterogeneous structure defects begin to develop at microlevels at low stress levels. The results presented in this article allow us to take into account the influence of structural defects on destruction processes, to consider destruction at different scales, and to introduce a new limiting state for the development of structural defect during operation of structures.

Fracture models are proposed to determine the type of fracture mechanism (tear-off or shear) in products under compressive stress.

Keywords: fracture, stress, multiscale, model, strength, concrete, wood

Природа разрушения твердых тел весьма разнообразна и зависит от строения структуры материала, вида статической и динамической нагрузки, агрессивности окружающей среды – химической активности, температуры, изменений во времени уровня нагрузки и многих других факторов. Особая роль в процессе разрушения твердых тел отводится дефектам структуры, которые в одних случаях являются инициаторами развития процесса разрушения, в других случаях могут тормозить развитие дефектов структуры.

Основные строительные материалы, применяемые для изготовления несущих конструкций, такие, как бетон и древесина, отличаются высокой неоднородностью структуры.

Древесина – материал неоднородного слоисто-волокнутого строения. Структура древесины формируется из волокон, состоящих из трахеидов и органических веществ (целлюлозы, лигнина), и большого количества пороков (дефектов): сучков (выпадающие, здоровые, гнилые, табачные); косослоя (тангентальный наклон волокон); трещин; сердцевин; смоляных кармашков; прорости; сухобокости и т.д.

Бетон – материал с многомасштабной, инвариантной неоднородностью структуры: зернами заполнителя, наполнителями, раковинами, порами и т.д. Поэтому механизм разрушения бетона, древесины и других материалов с неоднородной структурой неоднозначный, многоуровневый, не поддающийся описанию на основе принципов классической механики твердого тела.

Авторами предпринята попытка определения: условий, при соблюдении которых образцы из бетона и древесины под действием сжимающих усилий будут разрушаться путем реализации отрывного или сдвигового механизма; зависимости процесса разрушения от размеров дефектов структуры.

В классической теории сопротивления материалов разрушение твердого тела рассматривается как мгновенный акт, который наступает, как только некоторый критерий разрушения достигает предельного значения. Под разрушением понимается разделение образца, изделия на отдельные части, которое происходит под действием предельных напряжений или деформаций в какой-либо точке.

Для определения возможности разрушения твердого тела при росте деформаций и напряжений разработаны феноменологические механические теории прочности – теории локального предельного состояния. В качестве критериев разрушения предложено рассматривать предельные значения: нормальных напряжений; относительных деформаций; касательных напряжений; энергии упругих деформаций; изменения формы [1].

Тимошенко С.П. считает, что опытные данные, которыми мы располагаем в настоящее время, все без исключения противоречат этим теориям [1].

Филин А.П. утверждает, что разрушение твердого тела не является мгновенным актом, оно начинает возникать еще до появления видимых трещин; последним предшествует образование микротрещин или разрыхление «структуры». Разрушение может происходить от среза или отрыва [2].

В работах Л.М. Качанова, А.А. Ильюшина, В.В. Новожилова разрушение твердого тела предлагается рассматривать как процесс накопления повреждений в объеме изделия во времени, в процессе деформирования [3,4].

В ходе многочисленных исследований прочности и условий разрушения бетона, проведенных В.М. Бондаренко, О.Я. Бергом, Н.И. Карпенко, выявлены достаточно серьезные расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами [5–8].

Экспериментально установлено, что теория прочности, построенная на гипотезах об однородности, сплошности, упругости твердого тела, для описания разрушения бетона не подходит, так как структура бетона неоднородна, имеет дефекты, поры, микротрещины.

По мнению В.Н. Байкова, бетон физически представляет собой капиллярно-пористый материал, в котором присутствуют все три фазы – твердая, жидкая и газообразная; имеющиеся теории прочности к бетону неприменимы; разрушение сжимаемого образца происходит вследствие разрыва бетона в поперечном направлении; на первом этапе нагружения по всему объему возникают микротрещины отрыва, которые с ростом нагрузки соединяются, образуются видимые трещины, параллельные направлению действия сжимающих сил.

При осевом сжатии кубы разрушаются вследствие разрыва бетона в поперечном направлении. Наклон трещины обусловлен силами трения, которые развиваются на контактных поверхностях между подушкой пресса и гранями куба.

Главную роль вторичного поля напряжений в процессе разрушения бетона при осевом сжатии отмечает В.М. Бондаренко [5].

Фепель А. экспериментально показал, какую важную роль играют силы трения, имеющие место по граням кубика, контактирующим с подушками пресса. Путем смазки контактных торцов он уменьшил влияние сил трения при сжатии. При этом изменился вид разрушения: цементные кубы разделились вертикальными трещинами на несколько плиток; разрушающая нагрузка уменьшилась почти вдвое.

Залигер Р. экспериментально показал, что разрушение сжимаемых образцов может происходить как по косым плоскостям от сдвига, так и по продольным трещинам (от растяжения). Он предложил расчетную модель, из которой следует условие прочности, согласно которому разрушение произойдет по той наклонной плоскости, в которой нормальное напряжение σ_n достигнет своего минимума.

Соколовым Б.С. на основе экспериментальных данных разработана модель, описывающая процесс разрушения бетона при сжатии, сопротивлении отрыву, сдвигу и раздавливанию. В основу построения модели положена гипотеза об образовании под грузовой и опорными площадками уплотнения в виде клиньев, повторяющих в основании форму площадок опирания [8].

По мнению Ю.В. Зайцева, разрушение бетона под действием сжимающей нагрузки начинается с развития контактных трещин, расположенных между цементным камнем и зернами заполнителя. В основном трещины развиваются вдоль усилия сжатия, но могут отклоняться от этого направления, особенно в тяжелых бетонах низкой и средней прочности [9].

В результате многочисленных экспериментальных исследований прочности, деформативности и механизмов разрушения бетона установлено, что разрушение бетона – сложный эволюционный процесс, который развивается во времени. При этом на разных масштабных уровнях структуры могут действовать одновременно несколько механизмов разрушения: отрывной, сдвиговой, хрупкий, пластический [9].

Кудзис А.П. выделяет два уровня структуры: микроструктура – цементный камень; макроструктура – заполнитель, цементный камень, поры, дефекты, которые влияют на механизм разрушения бетона.

Михайлов В.В. предлагает при анализе процессов разрушения бетона выделить три масштабных уровня: макроструктуру, мезоструктуру и микроструктуру. При этом особое внимание уделяется микроструктуре, которая формируется в процессе твердения цементного камня путём химического взаимодействия «исходного цемента, новообразований, воды и воздуха».

В результате химических и механических процессов мелкие зерна (менее 10 мк) распадаются полностью на частицы коллоидных размеров (0,1 : 0,01 мк), образуя коллоидный клей. Вокруг более крупных частиц формируются коллоидные оболочки. Коллоидный клей, мелкие осколки клинкера, воздушные пузырьки являются составными элементами микроструктуры цементного камня.

С помощью специальной акустической установки В.В. Михайлов экспериментально установил, что процесс разрушения бетона начинается с образования микротрещины в структуре цементного камня. При растяжении передача усилия от частицы к частице происходит через капиллярные контакты, которые пластически реагируют на усилия [10, 11].

Многоуровневый, многомасштабный механизм разрушения структуры бетона чётко прослеживается на диаграммах деформирования, полученных при испытании в динамическом (непрерывном) режиме нагружения на сжатие при постоянной скорости деформирования (0,5 мм/мин). Получены диаграммы деформирования, которые наглядно отражают дискретно-непрерывный характер разрушения структуры бетона и подтверждают предположение о блочно-иерархическом строении структуры бетона [11].

Из анализа литературных данных следует, что разрушение бетона под действием сжимающих напряжений – сложный эволюционный процесс, который завершается путем реализации различных механизмов разрушения на разных масштабных уровнях. В литературе обсуждается возможность разрушения бетона под действием сжимающих усилий как путем отрыва, так и путем среза. Сценарий развития процесса разрушения зависит от: конструктивных особенностей сжимаемого элемента; способа приложения нагрузки; вида и способа армирования; состава и структуры бетона. Разрушение бетона под действием сжимающих нагрузок следует рассматривать как процесс, который может развиваться на разных масштабных уровнях с учетом дефектов структуры, вида заполнителя и специальных дисперсных наполнителей.

При построении расчетных моделей необходимо учитывать многомасштабность, инвариантность структуры бетона, применяя для этого методы механики разрушения (по А. Гриффитсу), фрактальной геометрии (по Б. Мандельброту).

Исторически сложилось так, что модели разрушения бетона и древесины основывались на применении первой теории прочности, сформулированной Г. Галилеем. Согласно первой теории прочности, предельное состояние материала наступает при достижении максимальным нормальным напряжением в окрестности рассматриваемой точки тела предельной (опасной) величины [1]. Многочисленные опыты показывают, что эта теория не отражает действительного характера поведения бетона и древесины под нагрузкой. Существует такая точка зрения, что эта теория применима лишь к случаям хрупкого разрушения, которые можно наблюдать при действии растягивающих напряжений. Поэтому при исследовании предельных состояний разрушения бетона в практике проектирования применяют методы, основанные на феноменологических представлениях.

Согласно феноменологии, реальностью является не то, что существует независимо от сознания, а то, на что сознание направлено. Применительно к построению модели

разрушения бетона этот подход предполагает следующую последовательность: на первом этапе определяется предельное нормальное напряжение в опасном сечении конструкции, а затем рассматриваются возможные распределения этих напряжений в расчетном сечении. При этом подходе не учитываются: особенности строения структуры бетона; влияние касательных напряжений, роль которых в сопротивлении бетона внешним нагрузкам достаточно велика.

В общем случае в плоскости разрушения железобетонных сжимаемых и изгибаемых элементов действуют как нормальные, так и касательные напряжения. Поэтому, согласно теории Кулона – Навье, разрушение произойдет в том случае, когда касательные напряжения, действующие в плоскости разрушения, достигнут величины:

$$[\tau_a] \leq R_{bt} + \gamma \sigma_b, \quad (1)$$

где R_{bt} – прочность бетона на сдвиг; σ_b – нормальные напряжения в плоскости разрушения; γ – коэффициент внутреннего трения.

Рассмотрим напряженное состояние призмы, на которую действуют усилия сжимающие N_x и усилия вторичного поля напряжений N_y (рис. 1).

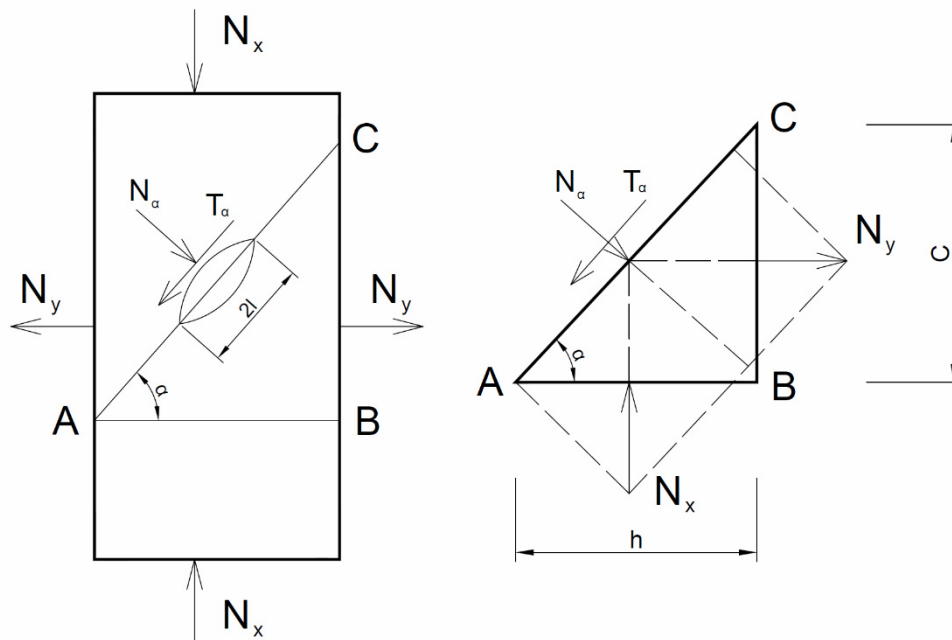


Рис. 1. Расчетная схема разрушения призмы из бетона (древесины)

Рассмотрим наклонное сечение, которое образует угол α с осью y .

Нормальное σ_a и касательное τ_a напряжения, возникающие в этом сечении, найдем из условия равновесия трехгранного элемента ABC (см. рис. 1).

Если через h обозначить сторону (основание призмы) элемента $AB = h$, то $BC = C = h \tan \alpha$; $AC = l = \frac{h}{\cos \alpha}$.

Проецируя силы N_x и N_y на вектор силы N_a и на вектор T_a , получаем:

$$N_a = N_y \sin \alpha - N_x \cos \alpha, \quad (2)$$

$$T_a = -N_y \cos \alpha - N_x \sin \alpha. \quad (3)$$

В напряжениях σ_x и σ_y эти уравнения примут вид:

$$\sigma_\alpha = \sigma_y \sin^2 \alpha - \sigma_x \cos^2 \alpha,$$

$$\tau_\alpha = -(\sigma_y + \sigma_x) \sin \alpha \cos \alpha.$$

Или после преобразований:

$$\sigma_\alpha = 0,5(\sigma_y - \sigma_x) - 0,5(\sigma_y + \sigma_x) \cos 2\alpha, \quad (4)$$

$$\tau_\alpha = \pm 0,5(\sigma_x + \sigma_y) \sin 2\alpha. \quad (5)$$

Согласно теории Кулона – Навье, разрушение твердого тела возможно, если будет выполняться условие

$$R_{b\tau} \leq \tau_\alpha - \gamma \sigma_\alpha \text{ или } R_{b\tau} \leq S. \quad (6)$$

С учетом функции τ_α и σ_α можем записать:

$$R_{b\tau} \leq -0,5(\sigma_x + \sigma_y) \sin 2\alpha - 0,5\gamma(\sigma_y - \sigma_x) + 0,5\gamma(\sigma_y + \sigma_x) \cos 2\alpha.$$

Из условия $\frac{dS}{d\alpha} = 0$ следует, что экстремальные значения функция S принимает при условии $\tan \alpha = -\frac{1}{\gamma}$. Тогда получаем:

$$2S = -(\sigma_x + \sigma_y)(1 - \gamma^2) \sin 2\alpha - \gamma(\sigma_y - \sigma_x). \quad (7)$$

Очевидно, экстремальные значения функция (7) принимает при $\alpha = 45^\circ$. Тогда можно записать:

$$R_{b\tau} \leq 0,5 \left[-(\sigma_x + \sigma_y)(1 - \gamma^2) - \gamma(\sigma_y - \sigma_x) \right]. \quad (8)$$

Из неравенства (8) получаем, если:

$$\sigma_y = 0, \text{ то } \sigma_x = \frac{2R_{b\tau}}{-(1 - \gamma^2) + \gamma}, \quad (9)$$

$$\sigma_x = 0, \text{ то } \sigma_y = \frac{2R_{b\tau}}{-(1 - \gamma^2) - \gamma}. \quad (10)$$

Если принять $\sigma_y = 0$, $2R_{b\tau} = 4R_{bt}$ и $\gamma = 0,5$, то, так как $\sigma_x > 16R_{bt}$ или $\sigma_x > 8R_{b\tau}$, разрушение возможно путем среза по наклонным сечениям. Если принять $\sigma_x = 0$, $\gamma = 0,5$, то при заданных условиях $\sigma_y > 3,2R_{bt}$ разрушение произойдет по отрывному механизму.

Коэффициент трения бетона по бетону предложено определить по формуле

$$\gamma = 0,519 + 0,0078R_b,$$

где R_b – прочность бетона на сжатие в кг/см^2 .

С учетом наличия дефектов прочность бетона на срез можно записать в виде функции $R_{bt} = \frac{K_{II}}{\sqrt{0,5\pi l}}$ и, соответственно, при растяжении $R_{bt} = \frac{K_I}{\sqrt{0,5\pi l}}$. Тогда функции, определяющие напряжения σ_x и σ_y примут вид:

$$\sigma_x = \frac{2K_{II}}{-(1-\gamma^2)+\gamma} \left[0,5\pi l_0 (\alpha)^{de-dm} \right]^{-0,5}, \quad (11)$$

$$\sigma_y = \frac{4K_I}{-(1-\gamma^2)-\gamma} \left[0,5\pi l_0 (\alpha)^{de-dm} \right]^{-0,5}. \quad (12)$$

В формулах (11) и (12) примем обозначения: K_I и K_{II} – коэффициент интенсивности напряжений при растяжении (K_I) и сдвиге (K_{II}); l_0 – размер характерного дефекта на масштабном уровне α ; de и dm – размерности по Евклиду и Мандельброту.

Полученные результаты позволяют производить расчет строительных конструкций из бетона и древесины с учетом дефектов структуры; проверять условие прочности на разных масштабных уровнях материала; рассматривать предельное состояние по образованию и развитию дефекта в процессе эксплуатации конструкции.

Список литературы

1. Тимошенко, С.П. Прочность и колебания элементов конструкций : избр. работы / С.П. Тимошенко ; под ред. Э.И. Григолюка. – Москва : Наука, 1975. – 704 с.
2. Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 1. Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики / А.П. Филин. – Москва : Наука, 1975. – 832 с.
3. Леденёв, В.В. Теоретические основы механики деформирования и разрушения : монография / В.В. Леденев, В.Г. Однолько, З.Х. Нгуен ; Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Тамбовский гос. технический ун-т». – Тамбов : ТГТУ, 2013. – 312 с.
4. Новожилов, В.В. О перспективах развития феноменологического подхода к проблеме разрушения твердых тел : докл. на Всесоюз. рабочем симпозиуме по вопросам малоциклового усталости / В.В. Новожилов. – Каунас, 1971. – 16 с.
5. Бондаренко, В.М. Конструктивная безопасность железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде / В.М. Бондаренко, Р.Е. Мигаль, Б.А. Ягупов // Строительство и реконструкция. – 2016. – №2. – С. 4–12.
6. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – Москва : Стройиздат, 1961. – 96 с.
7. Карпенко, С.Н. Модели деформирования железобетона в приращениях и методы расчёта конструкций : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Карпенко С.Н. – Москва, 2010. – 48 с.
8. Соколов, Б.С. Теория силового сопротивления анизотропных материалов сжатию и ее практическое применение / Б.С. Соколов. – Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011. – 159 с.
9. Зайцев, Ю.В. 50 лет применения механики разрушения для описания процесса деструкции и разрушения бетона / Ю.В. Зайцев // Международная научная конференция «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов». – Санкт-Петербург, 2012.
10. Селяев, В.П. Полимерные покрытия для бетонных и железобетонных конструкций / В.П. Селяев, Ю.М. Баженов, Ю.А. Соколова [и др.]. – Саранск : Средневолжское математическое общество, 2010. – 224 с.

11. Селяев? В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов : монография / В.П. Селяев, П.В. Селяев ; ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». – Саранск : Изд-во Мордовского университета, 2018. – 219 с.

References

1. Timoshenko, S.P. Strength and vibrations of structural elements : Selected works / S.P. Timoshenko ; edited by E.I. Grigolyuk. – Moscow : Nauka Publ., 1975. – 704 p.
2. Filin, A.P. Applied mechanics of a rigid deformable body. Vol. 1: Resistance of materials with elements of continuum theory and structural mechanics / A.P. Filin. – Moscow : Nauka Publ., 1975. – 832 p.
3. Ledenev, V.V. Theoretical foundations of deformation and fracture mechanics : a monograph / V.V. Ledenev, V.G. Odnolko, Z.H. Nguyen ; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education. education «Tambov State Technical University». – Tambov : TSTU, 2013. – 312 p.
4. Novozhilov, V.V. On the prospects for the development of a phenomenological approach to the problem of the destruction of solids : A report on the All-Union. a working symposium on low-cycle fatigue / V.V. Novozhilov. – Kaunas, 1971. – 16 p.
5. Bondarenko, V.M. Structural safety of reinforced concrete structures operating in an aggressive environment / V.M. Bondarenko, R.E. Migal, B.A. Yagupov // Construction and reconstruction. – 2016. – No. 2. – P. 4–12.
6. Berg, O.Ya. Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete / O.Ya. Berg. – Moscow: Stroyizdat, 1961. – 96 p.
7. Karpenko, S.N. Models of reinforced concrete deformation in increments and methods of structural calculation : abstract of the dissertation... Doctors of Sciences : 05.23.01 / Karpenko S.N. – Moscow, 2010. – 48 p.
8. Sokolov, B.S. Theory of force resistance of anisotropic materials to compression and its practical application / B.S. Sokolov. – Moscow : Publishing House of the Association of Construction Universities, 2011. – 159 p.
9. Zaitsev, Yu.V. 50 years of application of fracture mechanics to describe the process of destruction and destruction of concrete / Yu.V. Zaitsev // International Scientific conference «Mechanics of destruction of concrete, reinforced concrete and other building materials». – St. Petersburg, 2012.
10. Selyaev, V.P. Polymer coatings for concrete and reinforced concrete structures / V.P. Selyaev, Yu.M. Bazhenov, Yu.A. Sokolova [et al.]. – Saransk : Srednevolzhskoe Mathematical Society, 2010. – 224 p.
11. Selyaev, V.P. Physico-chemical foundations of the mechanics of destruction of cement composites : monograph / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev ; Ogarev National Research Mordovian State University. – Saransk : Publishing House of the Mordovian University, 2018. – 219 p.

Южно-Уральский государственный
университет (Национальный
исследовательский университет)

Россия, 54080, г. Челябинск,
просп. Ленина, 76

Ивашенко Юлий Алексеевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Архитектура»
E-mail: ivashenkoia@susu.ru

Шабиев Салават Галиевич,
доктор архитектуры, профессор,
зав. кафедрой «Архитектура»
E-mail: shabievsg@susu.ru

South Ural State University
(National Research University),

Russia, 454080, Chelyabinsk, 76, ave. Lenin
Street

Ivashenko Yuliy Alekseevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Architecture»
E-mail: ivashenkoia@susu.ru

Shabiev Salavat Galievich,
Doctor of Architecture, Professor,
Head of the Department «Architecture»
E-mail: shabievsg@susu.ru

КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Ю.А. Ивашенко, С.Г. Шабиев

Рассмотрены конструкции и материалы для экологического строительства жилых зданий из монолитных и сборных железобетонных перекрытий. Они представляют собой облегченный тип с частичным предварительным напряжением с болтовыми соединениями элементов. Результаты работы использованы в экспериментальном проекте шестиэтажного жилого здания.

Ключевые слова: инженерные облегченные конструкции, монолитное железобетонное перекрытие, сборное железобетонное перекрытие, проектирование жилых зданий, экологическое строительство

STRUCTURES AND MATERIALS FOR ECOLOGICAL CONSTRUCTION OF RESIDENTIAL BUILDINGS

Yu.A. Ivashenko, S.G. Shabiev

Structures and materials for ecological construction of residential buildings made of monolithic and prefabricated reinforced concrete slabs are presented. They represent a lightweight type with partial prestressing with bolted joints of elements. The results of the research are applied the experimental in project of a six-storey residential building.

Keywords: engineering lightweight structures, monolithic reinforced concrete slab, precast reinforced concrete slab, design of residential buildings, ecological construction

Необходимость решения задач, связанных с экологическим направлением в строительстве, обусловлена интенсивным развитием промышленности и сельского хозяйства, накоплением отходов и вредных выбросов, морально-этическим развитием общества, развитием науки, обострением вопросов охраны окружающей среды и потребностью в поиске новых подходов в экологическом строительстве [1–3].

Экологичность строительных конструкций обусловлена следующими факторами: формой, структурой, объемом применения, показателями, обеспечивающими эксплуатационные качества (безопасность, стойкость к опасным природным явлениям, шумоизоляция, теплоизоляция, пожаростойкость, санитарная безопасность), а также возможностью утилизации без последствий для окружающей среды. Так как названные факторы оказывают физическое и психологическое воздействие, то возникает задача применения конструкций и материалов, нейтральных по отношению к природе

и благоприятных по отношению к человеку, различным группам людей и этическому обществу в целом [4–6].

В экспериментальном проекте шестиэтажного жилого дома в климатических условиях Челябинской области предлагаются конструкции и материалы, имеющие показатели, соответствующие требованиям экологичности.

В а р и а н т №1. Материал с монолитными железобетонными перекрытиями облегченного типа и частичным предварительным напряжением (рис. 1).

Облегчение перекрытия (уменьшение массы) обеспечивается размещением в перекрытии газобетонных или пенобетонных блоков (сплошных или пустотелых) с образованием между ними зазоров шириной 80–100 мм. В зазоры устанавливается рабочая арматура, а затем они заполняются тяжелым бетоном. В результате создается система перекрестных балок (кессонное перекрытие).

Предварительное напряжение создается в зоне опирания монолитного перекрытия на колонну, ему подвергается верхняя рабочая арматура. Для ее размещения в процессе бетонирования создаются каналы. После натяжения арматуры по способу «на бетон» канал заполняется бетоном. Экологические признаки данной конструкции перекрытий состоят в создании плоского потолка, увеличении стойкости к сейсмическим воздействиям за счет уменьшения массы, повышении теплоизоляции и, соответственно, жаростойкости за счет применения газобетонных блоков. Также возрастает шумоизоляция за счет наличия газо- или пенобетонных блоков. Создание натяжения повышает жесткость и несущую способность перекрытия.

В сравнении со сплошными монолитными перекрытиями расход тяжелого бетона сокращается до 40 %, стали – на 50–60 %, а также снижается трудоемкость на 20 %.

В зависимости от величины полезной нагрузки и расстояния между опорами расход тяжелого бетона и стали составляет 0,10...0,12 м³/м² и 10...15 кг/м² соответственно.

В а р и а н т №2. Каркас из сборных железобетонных конструкций с болтовыми соединениями элементов (рис. 2).

Разделение перекрытий на сборные элементы осуществляется по схеме безбалочного перекрытия по авторскому свидетельству. В данной схеме применяются два вида сборных плит прямоугольной формы в плане. Для уменьшения массы перекрытия по аналогии с вариантом №1 используются пено- или газобетонные блоки.

После бетонирования образуется система перекрестных балок (кессонное перекрытие). Соединение плит между собой осуществляется замоноличиванием швов и болтовыми соединениями верхней рабочей арматуры, а также болтовым креплением надколонной плиты к колонне. Этот вариант перекрытия имеет аналогичные варианту №1 экологические признаки. Сборность перекрытия позволяет организовать производство элементов в стационарных условиях и повысить скорость возведения с учетом появления отрицательных температур.

В сравнении с существующими сборными перекрытиями, состоящими из балок (ригелей) и плит, предлагаемые варианты перекрытий имеют повышенную статическую неопределимость, что обеспечивает увеличение надежности при сокращении расхода тяжелого бетона и стали. Облегчение перекрытий приводит к снижению нагрузок на колонны и фундамент и уменьшению расхода материалов. Экологичность предлагаемым решениям добавляет использование в качестве исходных компонентов для строительных конструкций и материалов различных шлаков, образующихся в Южно-Уральском регионе в промышленных объемах в виде отходов при производстве черных металлов. После извлечения железа, грануляции и отделения свободной извести полученные фракции шлака являются хорошим строительным материалом.

В качестве строительных материалов шлаки применяются для следующих целей:

- доменные шлаки, медленно охлажденные, используются как основа для силикатоцементных и полевошпатных бетонов, железобетонных изделий;
- доменные шлаки, быстроохлажденные, применяются как активные гидравлические присадки при производстве цемента, бетонных блоков, известково-шлакового кирпича, песка для растворов, искусственного камня;

- вспученные шлаки используются для получения лёгких бетонов и шлаковой ваты;
- сталеплавильные шлаки применяются при производстве железобетонных изделий, бетонных блоков, песка для растворов, стойких к облучению бетонов.

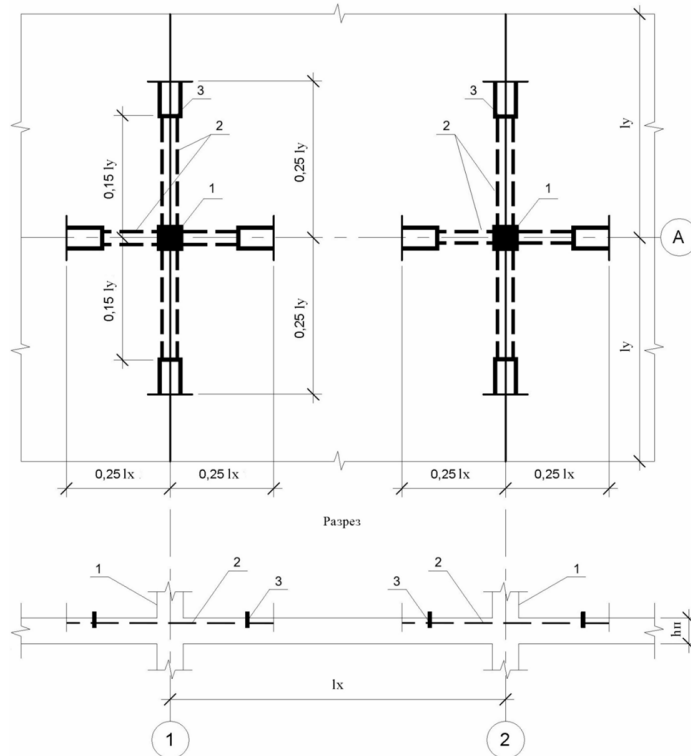


Рис. 1. Схема монолитного перекрытия с напряжённой арматурой:
1 – колонна; 2 – арматура в каналах; 3 – закладная деталь с анкерными стержнями;
 l_x и l_y – расстояние между колоннами; h_n – толщина перекрытия

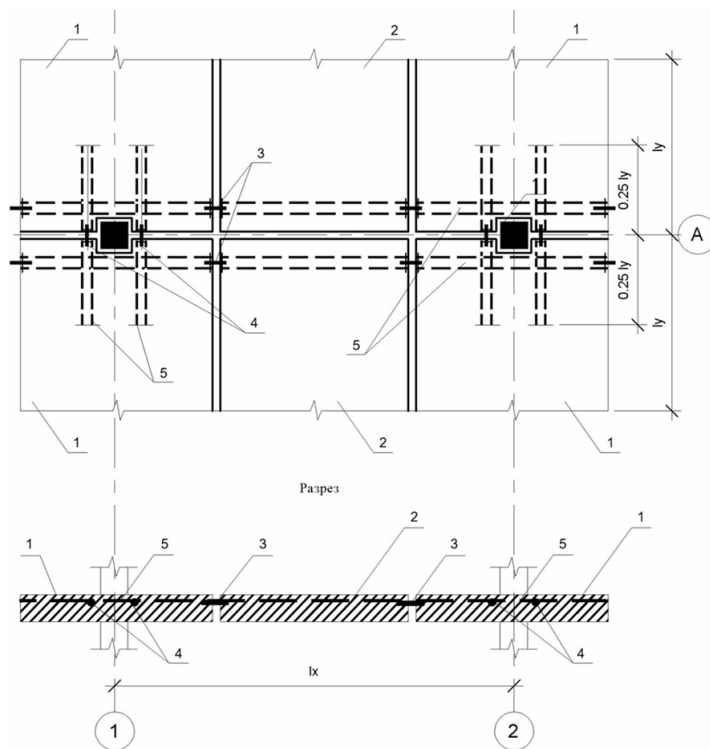


Рис. 2. Схема сборного перекрытия с болтовыми соединениями:
1 – плита по колоннам; 2 – плита промежуточная; 3 – болтовое соединение плит типа 1 и 2;
4 – болтовое соединение плит типа 1; 5 – рабочая верхняя арматура

Предлагаемые конструкции монолитного и сборного перекрытия, которые способствуют экологичности и экономичности при строительстве, использованы в экспериментальном проекте шестиэтажного жилого здания. В плане здание имеет форму, близкую к квадрату 18×19 м, и включает квартиры, места общего пользования, эксплуатируемую кровлю со спортивными площадками [7–9]. Жилой дом скомпонован таким образом, что образует центральный коммуникационный блок, вписанный в круг, с размерами 6×6 м, где расположены лестничная клетка, лифтовая шахта (рис. 3, а, б).

Все подсобные и вспомогательные помещения квартир примыкают к центральному коммуникационному блоку. Инновационно-экологической особенностью этой части дома является то, что к каждой квартире из этой лестницы имеется свободный доступ к инженерной инфраструктуре всех квартир. Компонировка энергосиловых установок в едином коммуникационном блоке позволяет одновременно задействовать вентиляционные, ветровые, температурные, солнечные энергетические потоки.

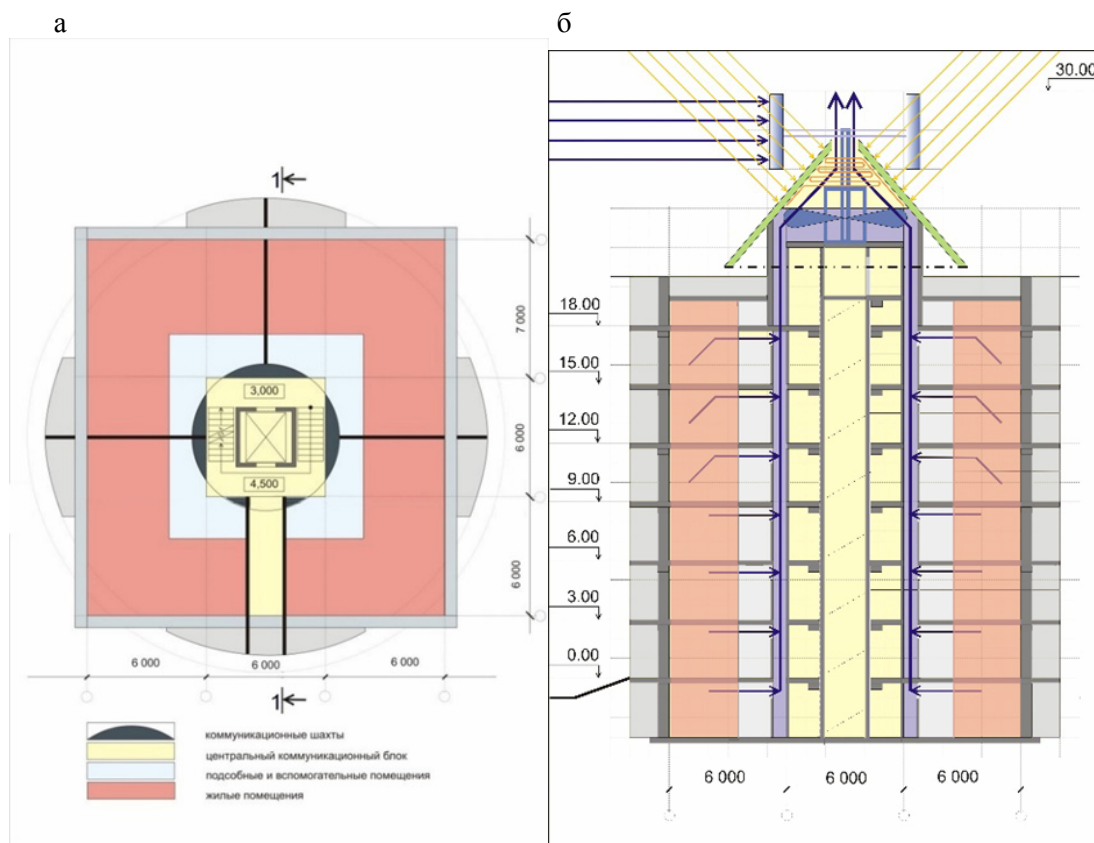


Рис. 3. Экспериментальный проект жилого здания:

а – схема типового этажа жилого здания; б – схема разреза жилого здания

Централизуется рекуперация, или вторичное использование излишков тепла, для более равномерного прогрева помещений, в том числе в соответствии с их ориентацией по сторонам света. В теплый период за счёт использования аэрационной энергетической турбины исключается вероятность опрокидывания вентиляционных потоков, обеспечивается сквозное проветривание.

Проектом предусмотрено применение солнечных батарей, расположенных стационарно на пяти гранях из восьмипирамидальной надстройки. Средняя грань ориентирована на юг, что обеспечивает равномерность работы солнечной батареи. Вертикальный наклон грани может регулироваться в зависимости от временных и сезонных изменений положения Солнца. Комплекс солнечных батарей может обеспечить электроэнергией все площади общего пользования, включая придомовую территорию.

На представленной схеме разреза здания четко прослеживается центральное конструктивное ядро жесткости вокруг лестнично-лифтового узла. Уникальным решением является наличие четырех вертикальных каналов для инженерной инфраструктуры, в которых сосредоточены воздуховоды, сети водоснабжения и канализации, кабели для электроэнергетики и медиасвязи. К воздуховодам из верхней части всех квартир примыкают вентиляционные отверстия, теплый воздух из которых собирается в едином канале и направляется вверх. Для использования тепла отходящего воздуха размещен теплообменник [10].

Качество проектирования состоит в использовании методов расчета, в которых учитываются неупругие свойства материалов и железобетонных элементов при определении внутренних усилий и особенности сопротивления бетона в железобетонных конструкциях.

Экологичность принятых конструкций и объемно-планировочных решений, а также инженерность оборудования состоят в повышении сейсмостойкости, теплоизоляции, надежности и энергооснащенности. Для повышения экологичности рассматриваются варианты строительства с использованием свайных фундаментов с образованием пространства между поверхностью земли и первым этажом зданий, что обеспечивает сохранение растительности и инсоляции.

В приведенном экспериментальном проекте шестиэтажного жилого дома, разработанном на основе экологического подхода во взаимоувязке с экологическими конструкциями, достигнута высокая экономичность и эффективность планировочной структуры здания, не имеющая аналогов в мировой практике. Проектные материалы, полученные в ходе выполнения НИР «Провести исследования и разработать проект экопоселения в Рощино Сосновского района Челябинской области», переданы заказчику для реализации (отчет о НИР, рук. темы Шабиев С.Г. / ЮУрГУ. – Челябинск, 2019).

Список литературы

1. Семенова, Э.Е. Влияние объемно-планировочного решения на энергоэффективность здания / Э.Е. Семенова, Г.В. Пономарева // Строительство и реконструкция : сборник научных трудов научно-практической конференции / Юго-Западный государственный университет. – Курск, 2019. – С.105–109.
2. Корюкова, Ю.Д. Экологическое строительство в России и в мире: развитие, проблемы и перспективы / Ю.Д. Корюкова, Л.В. Дайнеко. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭУ, 2021. – С. 37–43.
3. Слимач, И.В. Анализ отечественного и международного опыта проектирования и строительства энергоэффективных зданий / И.В. Слимач, М.П. Диндиенко, Н.В. Сергеева // ВЕСТНИК АлтГТУ. – 2018. – № 1. – С. 281–286.
4. Кокая, Д.В. Экологическая оценка теплоизоляционных материалов для ограждающей конструкции / Д.В. Кокая, Д.Д. Заборова // Неделя науки ИСИ : сборник материалов Всероссийской конференции. – 2022. – С. 372–375.
5. Цыпленков, Д. Современные строительные энергоэффективные материалы / Д. Цыпленков, О. Гамаюнова // Строительство: новые технологии – новое оборудование. – 2021. – № 12. – С. 6–11.
6. Шабиев, С.Г. Инновационные направления повышения эффективности несущих конструкций многоэтажных зданий из железобетона / С.Г. Шабиев, Ю.А. Ивашенко // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №3. – С. 90–99.
7. Михеев, Г.В. Формирование и реализация методов строительства малоэтажных зданий с использованием энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий / Г.В. Михеев, В.В. Волковская, Е.О. Дьякова, Н.Е. Турук, А.П. Пелипенко, А.С. Мазурин // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14., № 3. – URL: <https://esi.todav/PDF/25SAVN322>.

8. Михеев, Г.В. Современные технические решения при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений / Г.В. Михеев, М.А. Чубаров, Э.Д. Яновская [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 8.
9. Михеев, Г.В. Инженерные и архитектурные технологии проектирования зданий с учетом климатических особенностей территории / Г.В. Михеев, Е.Я. Капогузова, Ю.А. Вадимович [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 9.
10. Зубарев, К.П. Оптимизация сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций зданий. Обзор литературы / К.П. Зубарев, А.И. Бородулина, А.Р. Галлямова // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 6 (1042). – С. 51–53.

References

1. Semenova, E.E. The influence of spatial planning solutions on the energy efficiency of buildings / E.E. Semenova, G.V. Ponomareva // Construction and reconstruction : collection of scientific papers of the scientific and practical conference / Southwest State University. Kursk, 2019. – P.105–109.
2. Koryukova, Yu.D. Ecological construction in Russia and in the world: development, problems and prospects / Yu.D. Koryukova, L.V. Daineko. – St. Petersburg : Publishing House: St. Petersburg State University, 2021 – P. 37–43.
3. Slimak, I.V. Analysis of domestic and international experience in the design and construction of energy-efficient buildings / I.V. Slimak, M.P. Dindienko, N.V. Sergeeva // BULLETIN OF AltSTU. – 2018. – No. 1. – P. 281–286.
4. Kokaya, D.V. Environmental assessment of thermal insulation materials for enclosing structures / D.V. Kokaya, D.D. Zaborova // ISI Science Week. collection of materials of the All-Russian Conferenc. – 2022. – P. 372–375.
5. Tsyplenkov, D. Modern construction energy-efficient materials / D. Tsyplenkov, O. Gamayunova // Construction: new technologies – new equipment. – 2021. – No. 12. – P. 6–11.
6. Shabiev, S.G. Innovative directions for improving the efficiency of load-bearing structures of multi-storey buildings made of reinforced concrete / S.G. Shabiev, Yu.A. Ivashenko // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – No. 3. – P. 90–99.
7. Mikheev, G. V. Formation and implementation of methods for the construction of low-rise buildings using energy-efficient and resource-saving technologies / G. V. Mikheev, V. V. Volkovskaya, E. O. Dyakova, N. E. Turuk, A. P. Pelipenko, A. S. Mazurin // Bulletin of Eurasian Science. – 2022. – Vol. 14. – No. 3. URL: <https://esi.today/PDF/25SAVN322>
8. Mikheev, G.V. Modern technical solutions in the construction and operation of buildings and structures / G.V. Mikheev, M.A. Chubarov, E.D. Yanovskaya [et al.] // Bulletin of Eurasian Science. – 2020. – Vol. 12, No. 3. – P. 8.
9. Mikheev, G.V. Engineering and architectural technologies for designing buildings taking into account the climatic features of the territory / G.V. Mikheev, E.Ya. Kapoguzova, Yu.A. Vadimovich [et al.] // Bulletin of Eurasian Science. – 2021. – Vol. 13, No. 1. – P. 9.
10. Zubarev, K.P. Optimization of resistance to heat transfer of translucent structures of buildings. Literature review / K.P. Zubarev, A.I. Borodulina, A.R. Gallyamova // BST: Bulletin of Construction Machinery. – 2021. – № 6 (1042). – P. 51–53.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Россия, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1, тел.: +7 (843) 510-47-09

Замалиев Фарит Сахапович,

кандидат технических наук,

доцент кафедры МКИИС

E-mail: zamaliev49@mail.ru

Замалиев Эмиль Фаритович,

инженер

Kazan State University of Architecture and Engineering

Russia, 420043, Kazan, 1, Zelenaya St.,

Phone: +7 (843) 510-47-09

Zamaliev Farit Sahapovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor

E-mail: zamaliev49@mail.ru

Zamaliev Emil Faritovich,

Engineer

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕРЕВОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Ф.С. Замалиев, Э.Ф.Замалиев

Проанализированы деревобетонные перекрытия составного сечения из деревянных балок и монолитной железобетонной плиты, где бетон находится преимущественно в сжатой зоне, а деревянная балка – в зоне растяжения. Проведены численные исследования, выявлены рациональные параметры сечения плиты и рациональный шаг балок.

Ключевые слова: деревобетон, деревянная балка, бетонная плита, численные методы, напряженно-деформированное состояние, прочность, прогибы

NUMERICAL INVESTIGATIONS OF WOOD-CONCRETE OVERLAP

F.S. Zamaliev, E.F. Zamaliev

The article analyzes wood-concrete floors composed of wooden beams and a monolithic reinforced concrete slab, where concrete is located mainly in the compression zone, and the wooden beam is in the tension zone. Numerical studies have been carried out, rational parameters of the slab section and rational beam spacing have been identified.

Keywords: wood concrete, wooden beam, concrete slab, numerical methods, stress-strain state, strength, deflections

С древних времен дерево было одним из основных конструктивных строительных материалов. Лавры первенства в развитии строительных конструкций принадлежат деревянным конструкциям, а именно прообразу балки – стволу дерева, который случайно упал через ущелье и по которому прошел первобытный человек. В Древней Индии раньше всех применяли деревянные арки, в России – деревянный сруб. Деревянная балка составного сечения также была предложена в России инженером Деревягиным. Однако надежное составное деревянное сечение стало возможным только с появлением технологии клееных деревянных конструкций. Кроме того, клееная древесина приобрела и новые качества: увеличенную прочность, улучшенную технологичность изготовления, долговечность и огнестойкость.

Человечество всегда стремилось исправить недостатки натуральной древесины или улучшить эксплуатационные качества, соединяя ее с другими материалами. Так появилась термомодифицированная древесина [1]. В последние годы на строительном рынке наметилась тенденция востребованности древесно-полимерных материалов и конструкций из них [2], а также деревобетонных конструкций [3]. Древесно-полимерные материалы представляют собой композиционный материал на основе полимеров и наполнителя из древесной муки, получаемой измельчением отходов деревообработки.

В последние годы в строительной практике развитых стран наметилось такое направление, как проектирование, производство и возведение конструкций составного

сечения из материалов с разными физико-механическими характеристиками. В конструкциях, преимущественно работающих на изгиб, хорошие эксплуатационные показатели показало применение в сжатой зоне бетона, а в растянутой – дерева.

Исследования деревобетонного перекрытия с деревянными балками-ребрами. Деревобетонное перекрытие, где удачно сочетается дерево с бетоном, представлено на рис. 1.

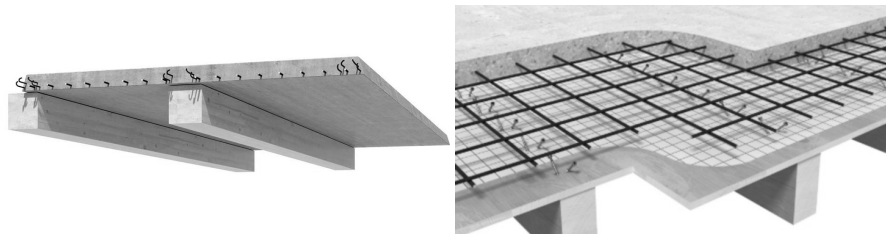


Рис. 1 Перекрытие Holz-Beton-Verbunddecke [7]

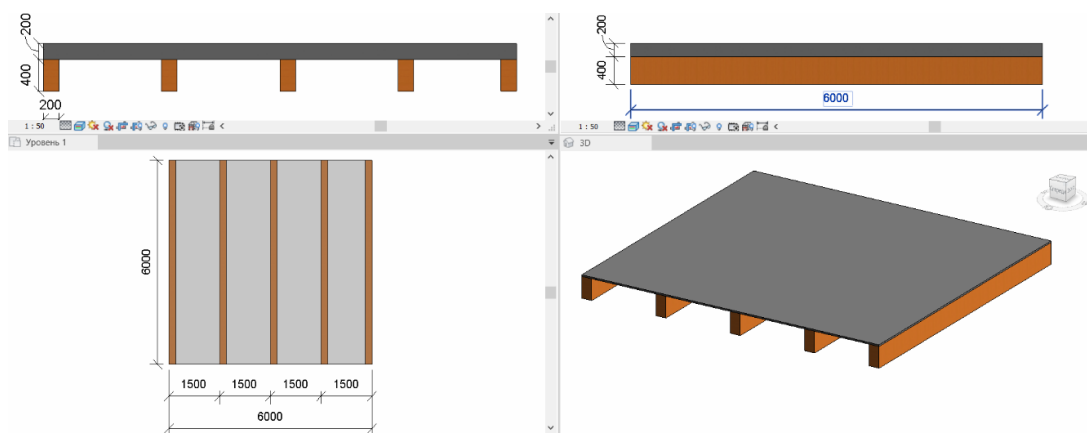


Рис. 2. План и аксонометрия фрагмента деревобетонного перекрытия

За базовое перекрытие принята железобетонная плита размерами 6×6 м, деревянные балки прямоугольного сечения с шагом 1.5 м.

Характеристики деревянной балки – сосна с влажностью 30-40 %, модуль упругости которой равен 12000 т/м², коэффициент Пуассона 0,3 и удельный вес материала 1,1 т/м³. Балка имеет размеры в сечении 30×50 см (Ш×В) и длину 6 м. Для бетонных вставок был использован бетон марки В25, характеристики материала – модуль упругости 3000000 т/м², коэффициент Пуассона 0,2 и удельный вес материала 2,75 т/м³.

Реализация в ПК Лира: железобетонное перекрытие задано пластиной-оболочкой, деревянные балки – стержни; закрепление балок шарнирное.

Поперечное сечение деревянной балки представляет собой прямоугольник со сторонами b и $2b$, имеет размеры 20×40 см.

Приложено 3 вида нагрузок:

1-е загрузение – собственный вес;

2-е загрузение – постоянные нагрузки, таковыми являются вес перегородок, вес напольного покрытия и т.п. В нашем случае приложена равномерно распределенная нагрузка на плиту (бетонную плиту), равная 0,5 т/кв.м;

3-е загрузение – временные нагрузки, здесь учитывается вес оборудования, мебели, людей. В данном случае эта нагрузка принята равной 0,48 т/кв.м (было принято, что данное перекрытие установлено в общественном административном здании).

Исследование влияния толщины бетонной плиты. Деревобетонное перекрытие представляет собой железобетонную плиту перекрытия и дощатоклеенные деревянные балки прямоугольного сечения. Перекрытие имеет размеры 6×6 м, сечение деревянной балки – 40×20 см, шаг 1.5 м.

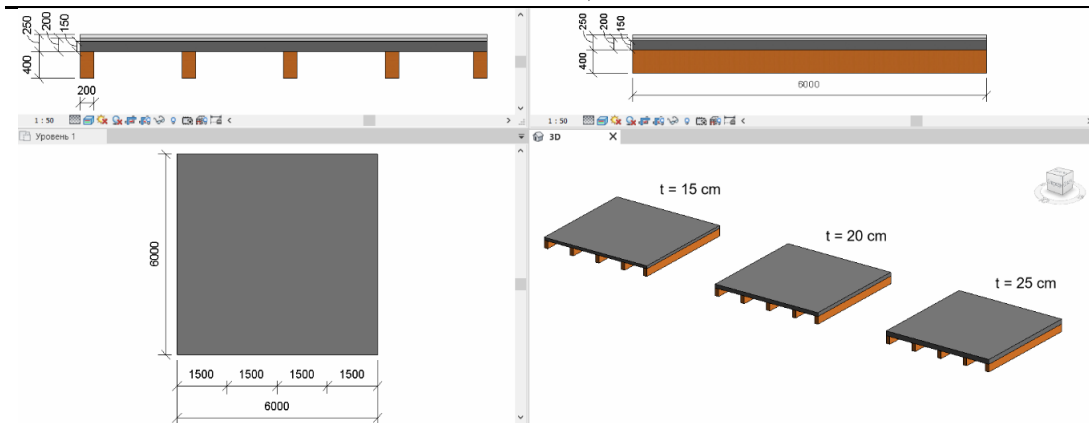


Рис. 3. Реалистичный вид сравниваемых перекрытий (Revit)

Для исследования влияния толщины железобетонной плиты было принято рассмотреть три варианта толщин: 1) 15 см; 2) 20 см; 3) 25 см.

Заданные типы перекрытия были смоделированы в ПК Ли́ра САПР, железобетонная плита задана как пластинчатый элемент, деревянные балки – стержни; закрепление балок – шарнирное.

Во всех трех случаях были приложены три типа нагрузок:

- 1 – собственный вес конструкции;
- 2 – постоянная нагрузка, действующая на балку;
- 3 – полезная нагрузка, действующая на балку.

Как и в вышеуказанных расчетах, нагрузки были приняты равными:

- постоянные нагрузки – $0,5 \text{ т/м}^2$;
- полезные нагрузки – $0,48 \text{ т/м}^2$.

Далее производился расчет на прогибы в ПК Ли́ра САПР, результаты представлены ниже.

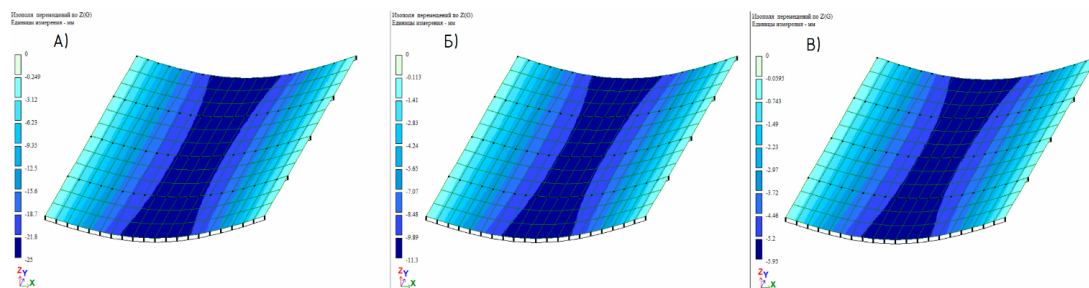
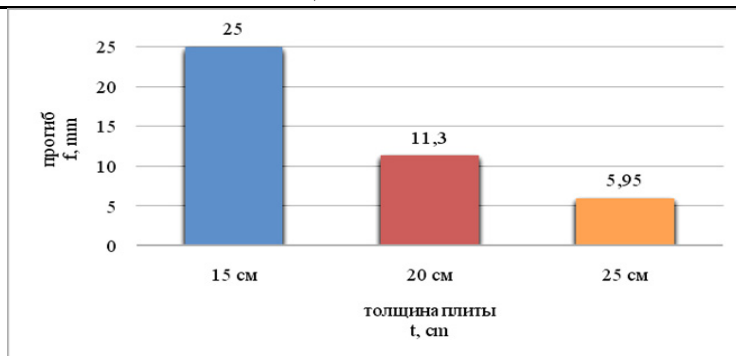


Рис. 4. Изополя перемещений по оси OZ для деревобетонных перекрытий (толщина плиты А – 15 см; Б – 20 см; В – 25 см)

Исходя из изополей перемещений по оси OZ можно говорить о том, что максимальные прогибы по оси OZ при действии всех нагрузок для деревобетонных перекрытий равны:

- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 15 см прогиб $f_{\max} = 25 \text{ мм}$;
- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 20 см прогиб $f_{\max} = 11.3 \text{ мм}$;
- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 25 см прогиб $f_{\max} = 5.95 \text{ мм}$.

Для наглядности ниже представлен график зависимости величины прогиба от толщины железобетонной плиты (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость прогиба перекрытия f от толщины железобетонной плиты

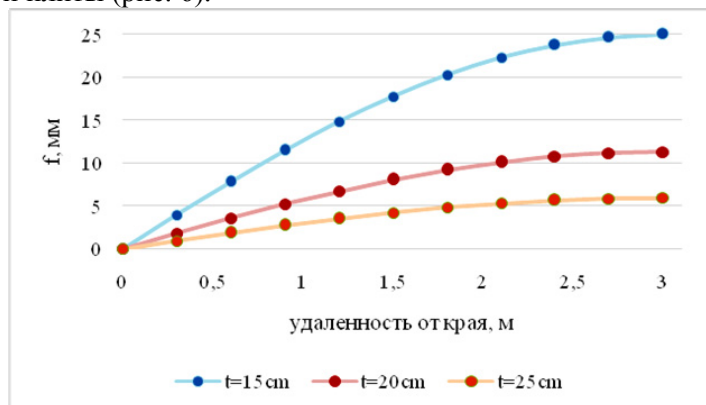
Для анализа составлена таблица (табл. 1) результатов прогибов для деревобетонного перекрытия с разными толщинами железобетонной плиты. График строился по степени удаленности от места закрепления перекрытия (удаленность от края перекрытия), то есть минимальный прогиб был взят у места закрепления балки (удаленность, таким образом, равна 0, и прогиб в этом месте также равен 0), а максимальный прогиб перекрытия в его центре. Удаленность от края составила 3 м (так как вся длина перекрытия – 6 м). Так были выписаны значения для трех деревобетонных перекрытий с разной толщиной плиты.

Т а б л и ц а 1

Прогибы деревобетонного перекрытия при разной толщине плиты
(3 варианта толщины плиты)

Удаленность от края перекрытия, м	Толщина ж/б плиты			
	$t=15$ см	$t=20$ см	$t=25$ см	
0	0	0	0	Прогибы, мм
0.3	3.97	1.8	0.94	
0.6	7.83	3.55	1.86	
0.9	11.47	5.2	2.73	
1.2	14.81	6.71	3.53	
1.5	17.77	8.05	4.23	
1.8	20.27	9.19	4.83	
2.1	22.28	10.1	5.31	
2.4	23.75	10.76	5.66	
2.7	24.64	11.16	5.87	
3	25	11.3	5.95	

Согласно данным, приведенным в табл. 1, был выполнен анализ и построен график зависимости величины прогиба деревобетонного перекрытия по оси OZ от толщины железобетонной плиты (рис. 6).

Рис. 6. Зависимость прогиба f от толщины ж/б плиты

Исходя из графика (см. рис. 6) можно говорить о том, что с увеличением толщины железобетонной плиты происходит уменьшение прогибов всего деревобетонного перекрытия. Хотя все полученные значения прогибов соответствуют нормативам и ни один не превышает критического значения, наиболее оптимальным можно считать толщину плиты, равную 20 см, так как прогиб данного перекрытия почти в два раза меньше, чем прогиб перекрытия с толщиной плиты 15 см, но расход материала (в частности бетона), а также вес конструкции меньше, чем у перекрытия с толщиной плиты в 25 см.

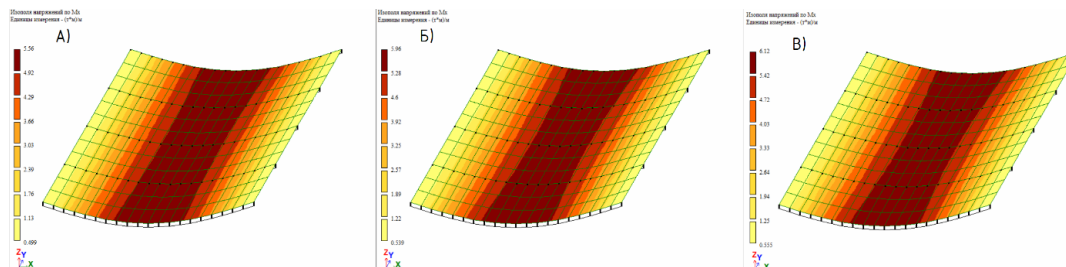


Рис. 7. Изополя напряжения по M_x для деревобетонных перекрытий (толщина плиты А – 15 см; Б – 20 см; В – 25 см)

Проанализируем напряжения в пластинах по M_x (под пластиной понимается плита) и усилия в стержнях по M_y (в нашем случае стержнями выступают деревянные балки, поэтому данное исследование покажет усилия именно в балках).

Исходя из изополей напряжений по M_x , можно говорить о том, что их максимальные значения при действии сочетания нагрузок для деревобетонных перекрытий равны:

- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 15 см прогиб $\sigma_{\max}$ по $M_x = 5.56$ т·м/м;
- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 20 см прогиб $\sigma_{\max}$ по $M_x = 5.96$ т·м/м;
- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 25 см прогиб $\sigma_{\max}$ по $M_x = 6.12$ т·м/м.

На рис. 8 представлен график зависимости величины напряжений по M_x от толщины железобетонной плиты.

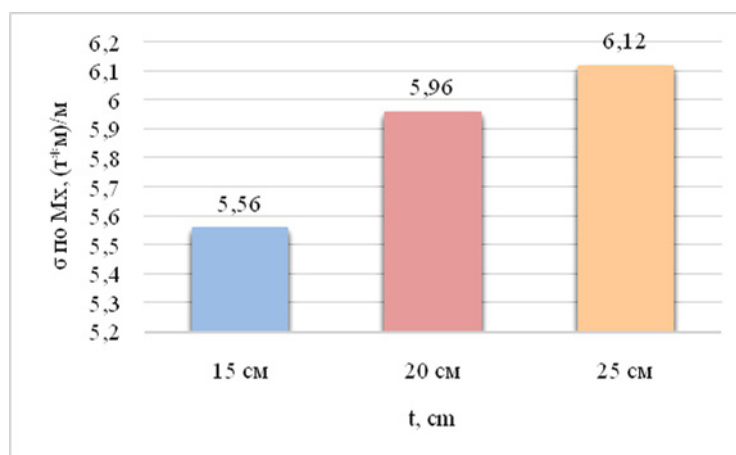


Рис. 8. Зависимость напряжений по M_x от толщины железобетонной плиты

Составлена таблица (табл. 2) результатов напряжений по M_x для деревобетонного перекрытия с разными толщинами железобетонной плиты. График строился по степени удаленности от места закрепления перекрытия (удаленность от края перекрытия), то есть минимальное значение было взято у места закрепления балки (удаленность, таким образом, равна 0, и напряжение в этом месте также равно 0), а максимальное напряжение перекрытия расположено в его центре. Удаленность от края

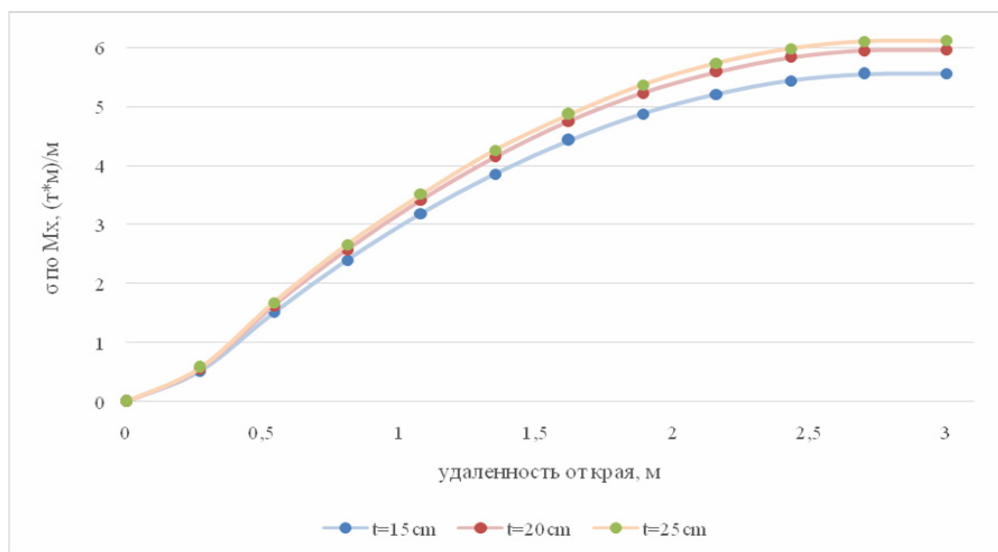
составила 3 м (так как вся длина перекрытия – 6 м). Так были выписаны значения для трех деревобетонных перекрытий с разной толщиной плиты.

Т а б л и ц а 2

Прогибы деревобетонного перекрытия при разной толщине плиты
(3 варианта толщины плиты)

Удаленность от края перекрытия, м	Толщина ж/б плиты			
	$t=15 \text{ см}$	$t=20 \text{ см}$	$t=25 \text{ см}$	
0	0	0	0	Напряжение по M_x , $(\text{т}^*\text{м})/\text{м}$
0.27	0.52	0.56	0.58	
0.54	1.51	1.63	1.68	
0.81	2.4	2.58	2.66	
1.08	3.19	3.42	3.52	
1.35	3.86	4.15	4.26	
1.62	4.43	4.75	4.87	
1.89	4.88	5.23	5.37	
2.16	5.21	5.59	5.74	
2.43	5.44	5.83	5.98	
2.7	5.55	5.95	6.11	
3	5.56	5.96	6.12	

Согласно данным, приведенным в табл. 2, был выполнен анализ и построен график зависимости величины напряжений по M_x деревобетонного перекрытия от толщины железобетонной плиты (рис. 9).

Рис. 9. Зависимость напряжения по M_x от толщины ж/б плиты

Исходя из графика (см. рис. 9) можно говорить о том, что с увеличением толщины железобетонной плиты возрастают и напряжения по M_x деревобетонного перекрытия.

Согласно изополям усилий в стержнях (балках) по M_y можно говорить о том, что их максимальные значения при действии сочетания нагрузок равны:

- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 15 см усилия в стержнях $F_{\max}$ по $M_y = 0.213 \text{ т}\cdot\text{м}$;
- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 20 см усилия в стержнях $F_{\max}$ по $M_y = 0.0964 \text{ т}\cdot\text{м}$;
- для деревобетонного перекрытия с толщиной железобетонной плиты 25 см усилия в стержнях $F_{\max}$ по $M_y = 0.0508 \text{ т}\cdot\text{м}$.

Ниже представлен график зависимости величины усилий в стержнях по M_y от толщины железобетонной плиты (рис. 10).

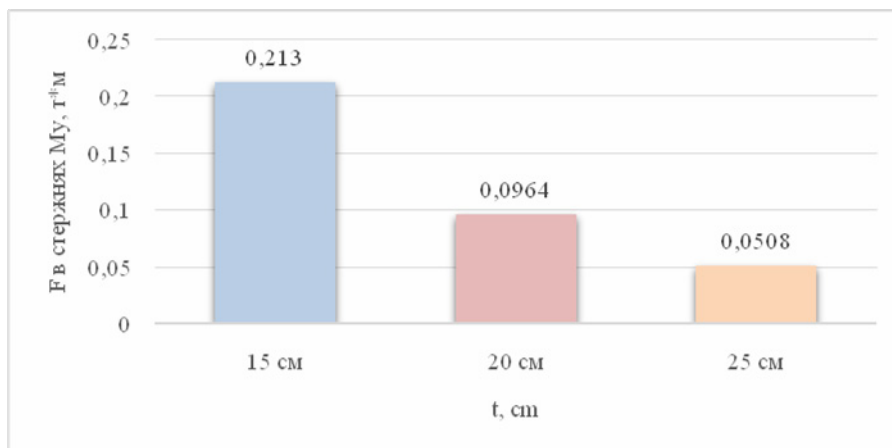


Рис. 10. Зависимость усилий в стержнях (балках) по M_y от толщины ж/б плиты

Составлена таблица (табл. 3) результатов усилий в стержнях по M_y для деревобетонного перекрытия с разными толщинами железобетонной плиты. График строился для самого нагруженного стержня по степени удаленности от места закрепления его конца (удаленность от края), то есть минимальное значение было взято у места закрепления балки (удаленность, таким образом, равна 0, и усилие в этом месте также равно 0), а максимальное напряжение перекрытия расположено в его центре. Удаленность от края составила 3 м (так как вся длина – 6 м). Так были выписаны значения для трех деревобетонных перекрытий с разной толщиной плиты.

Т а б л и ц а 3

Усилия в стержнях перекрытия при разной толщине плиты
(3 варианта толщины плиты)

Удаленность от края перекрытия, м	Толщина ж/б плиты			
	$t=15\text{ см}$	$t=20\text{ см}$	$t=25\text{ см}$	
0	0	0	0	Усилия в стержнях по M_y , (т*м)/м
0.27	0.008	0.0016	0.0006	
0.54	0.036	0.017	0.0095	
0.81	0.069	0.033	0.017	
1.08	0.101	0.047	0.025	
1.35	0.129	0.06	0.031	
1.62	0.154	0.0706	0.037	
1.89	0.174	0.0795	0.041	
2.16	0.19	0.0865	0.045	
2.43	0.202	0.0916	0.048	
2.7	0.209	0.0947	0.049	
3	0.213	0.0964	0.0508	

Согласно данным, приведенным в табл. 3, был выполнен анализ и построен график зависимости величины усилий в стержнях по M_y деревобетонного перекрытия от толщины железобетонной плиты (рис. 11).

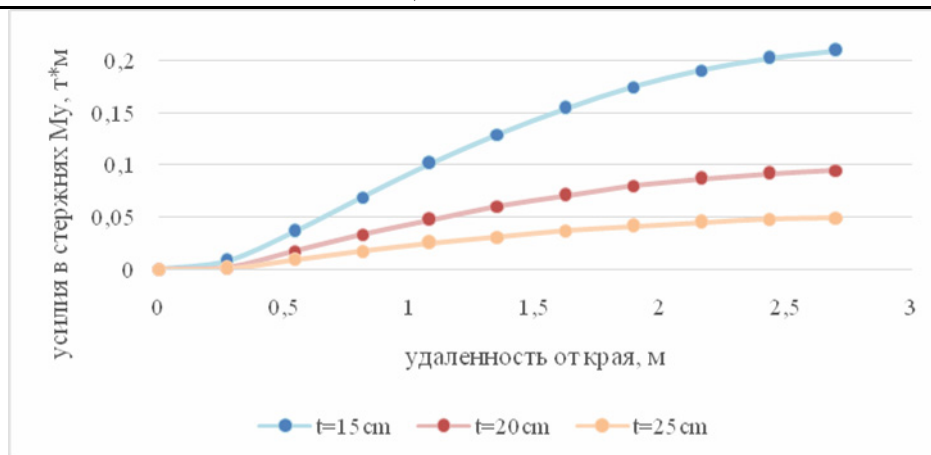


Рис. 11. Зависимость усилий в стержнях (балках) по M_y от толщины ж/б плиты

Исходя из графика (см. рис. 11) можно говорить о том, что с увеличением толщины железобетонной плиты усилия в стержнях (балках) деревобетонного перекрытия уменьшаются.

Однако необходимо исследовать, как ведут себя деревобетонные перекрытия с заданными толщинами бетонных плит при воздействии на них нагрузок разной величины.

Исследование влияния шага деревянных балок

Деревобетонное перекрытие представляет собой железобетонную плиту перекрытия и дощатоклееные деревянные балки прямоугольного сечения. Перекрытие имеет размеры 6×6 м, сечение деревянной балки – 40×20 см.

Для исследования влияния толщины железобетонной плиты было принято рассмотреть три варианта шага балок: 1 м; 1,5 м; 2 м.

Заданные типы перекрытия были смоделированы в ПК Ли́ра САПР, железобетонная плита задана как пластинчатый элемент (оболочка), деревянные балки – стержни; закрепление балок – шарнирное.

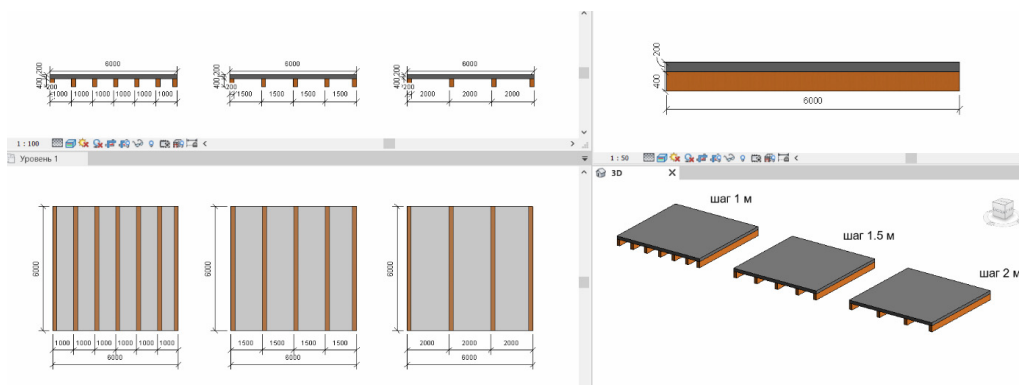


Рис. 12. Реалистичный вид сравниваемых перекрытий (Revit)

Во всех трех случаях были приложены три типа нагрузок:

- 1 – собственный вес конструкции;
- 2 – постоянная нагрузка, действующая на балку;
- 3 – полезная нагрузка, действующая на балку.

Как и в вышеуказанных расчетах, нагрузки были приняты равными:

- постоянные нагрузки – 0,5 т/м²;
- полезные нагрузки – 0,48 т/м².

Далее производился расчет на прогибы в ПК Ли́ра САПР, результаты представлены на рис.13.

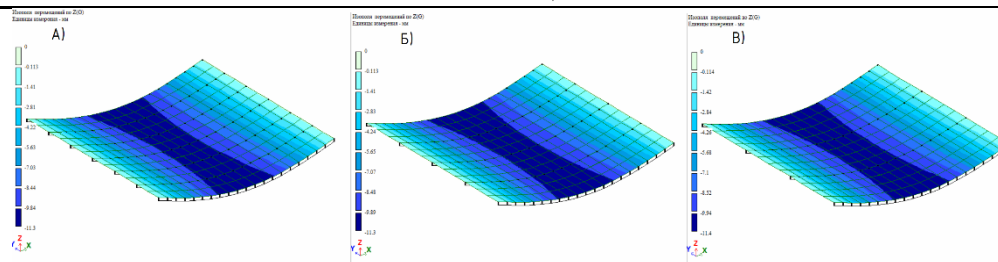


Рис. 13. Изополю перемещений по оси OZ для деревобетонных перекрытий (шаг балок А – 1 м; Б – 1.5 м; В – 2 м)

Исходя из изополей перемещений по оси OZ можно говорить о том, что максимальные прогибы по оси OZ при действии сочетания нагрузок для деревобетонных перекрытий равны:

- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 1 м
прогиб $f_{\max} = 11.3$ мм;
- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 1.5 м
прогиб $f_{\max} = 11.3$ мм;
- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 2 м
прогиб $f_{\max} = 11.4$ мм.

Для наглядности ниже представлен график зависимости величины прогиба от толщины железобетонной плиты (рис. 14).

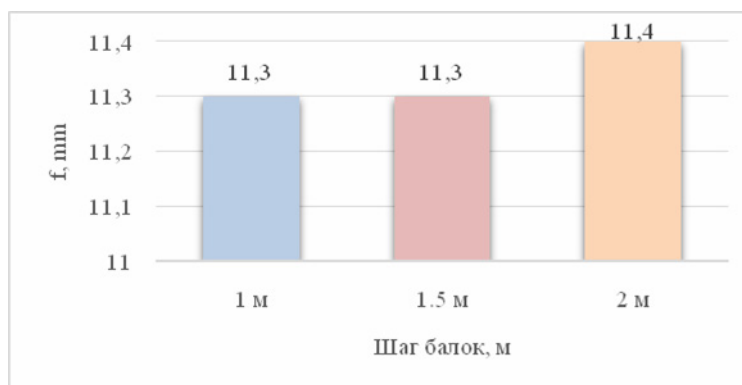


Рис. 14. Зависимость прогиба перекрытия f от шага деревянных балок

Для анализа составлена таблица (табл. 4) результатов прогибов для деревобетонного перекрытия с разным шагом деревянных балок. График строился по степени удаленности от места закрепления перекрытия (удаленность от края перекрытия), то есть минимальный прогиб был взят у места закрепления балки (удаленность, таким образом, равна 0, и прогиб в этом месте также равен 0), а максимальный прогиб перекрытия в его центре. Удаленность от края составила 3 м (так как вся длина перекрытия – 6 м). Так были выписаны значения для трех деревобетонных перекрытий с разным шагом балок.

Т а б л и ц а 4

Прогибы деревобетонного перекрытия при разном шаге балок
(3 варианта шага балок)

Удаленность от края перекрытия, м	Шаг балок, м			
	1 м	1.5 м	2 м	
1	2	3	4	5
0	0	0	0	Прогибы, мм
0.3	1.791	1.8	1.816	
0.6	3.532	3.55	3.577	
0.9	5.175	5.2	5.236	

1	2	3	4	5
1.2	6.681	6.71	6.755	
1.5	8.015	8.05	8.099	
1.8	9.147	9.19	9.239	
2.1	10.053	10.1	10.15	
2.4	10.713	10.76	10.815	
2.7	11.115	11.16	11.219	
3	11.3	11.3	11.4	

Согласно данным, приведенным в табл. 4, был выполнен анализ и построен график зависимости величины прогиба деревобетонного перекрытия по оси OZ от шага деревянных балок (рис. 15).

Исходя из графика (см. рис. 15) можно говорить о том, что с увеличением шага балок прогибы перекрытия увеличиваются, но их величины очень незначительно отличаются друг от друга.

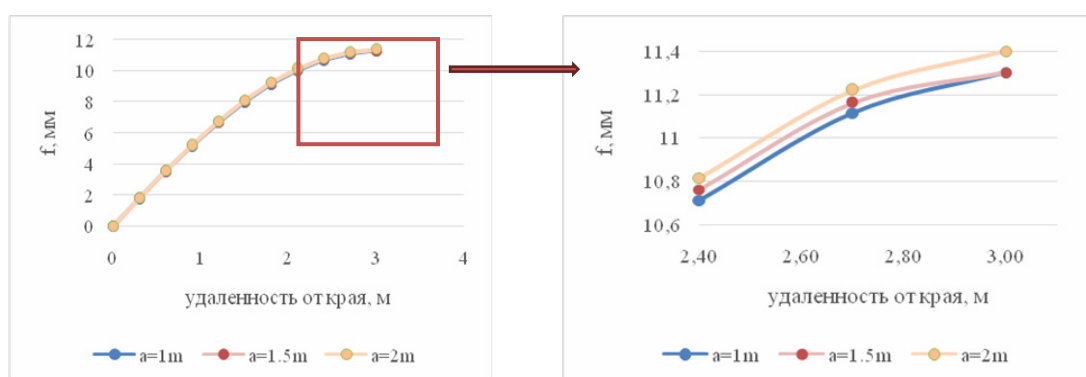


Рис. 15. Зависимость прогиба f от шага балок (справа – увеличенная часть графика)

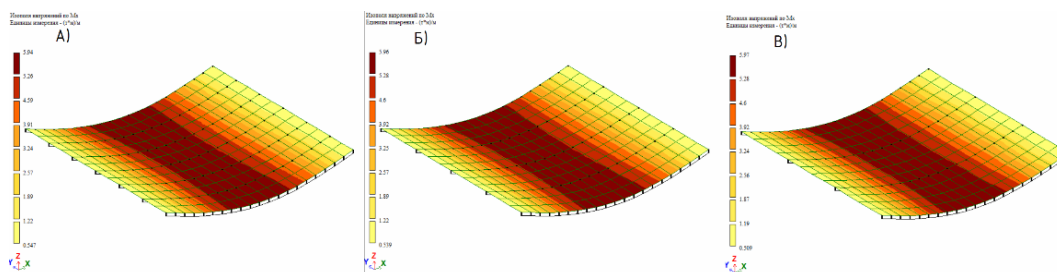
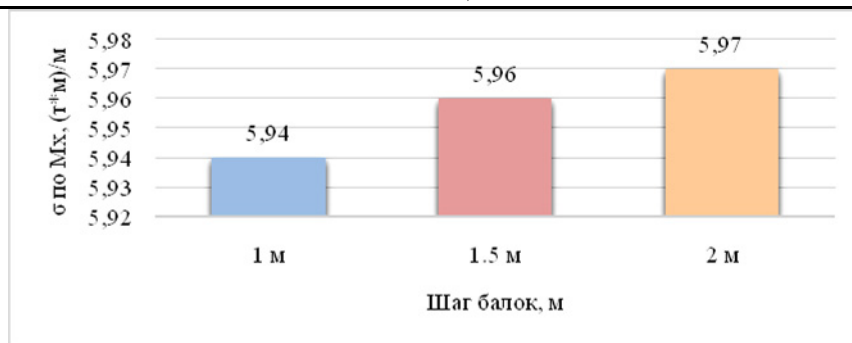


Рис. 16. Изополю напряжений по M_x для деревобетонных перекрытий (шаг балок А – 1 м; Б – 1.5 м; В – 2 м)

Согласно изополюм напряжений по M_x можно говорить о том, что максимальные значения при действии сочетания нагрузок для деревобетонных перекрытий равны:

- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 1 м
напряжение $\sigma_{\max}$ по $M_x = 5.94$ т·м/м;
- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 1.5 м
напряжение $\sigma_{\max}$ по $M_x = 5.96$ т·м/м;
- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 2 м
напряжение $\sigma_{\max}$ по $M_x = 5.97$ т·м/м.

На рис. 17 представлен график зависимости величины прогиба от толщины железобетонной плиты.


 Рис. 17. Зависимость напряжения по M_x от шага деревянных балок

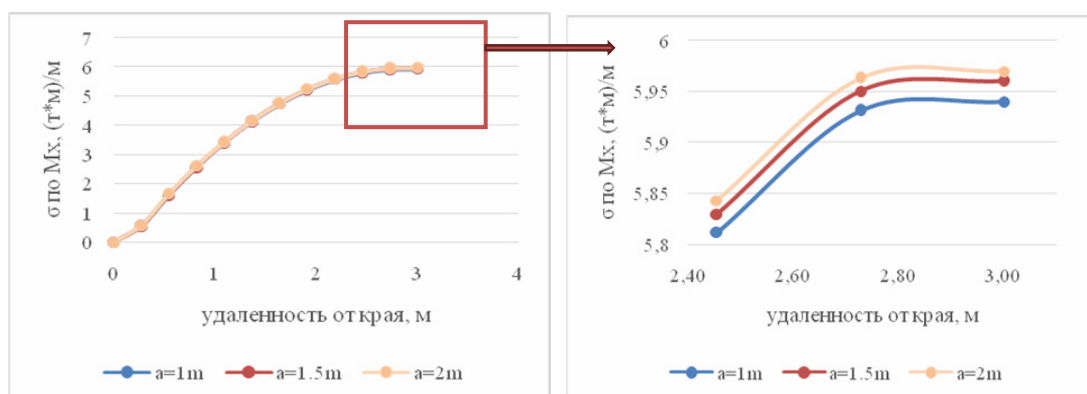
Для более подробного анализа составлена таблица (табл. 5) результатов напряжений по M_x для деревобетонного перекрытия с разным шагом деревянных балок. График строился по степени удаленности от места закрепления перекрытия (удаленность от края перекрытия), то есть минимальное значение было взято у места закрепления балки (удаленность, таким образом, равна 0, и прогиб в этом месте также равен 0), а максимальное значение в его центре. Удаленность от края составила 3 м (так как вся длина перекрытия – 6 м). Так были выписаны значения для трех деревобетонных перекрытий с разным шагом балок.

Таблица 5

 Напряжения по M_x перекрытия при разном шаге балок
(3 варианта шага балок)

Удаленность от края перекрытия, м	Шаг балок, м			
	1 м	1.5 м	2 м	
0	0	0	0	Напряжение по M_x , т·м/м
0.27	0.563	0.56	0.583	
0.55	1.627	1.63	1.668	
0.82	2.588	2.58	2.612	
1.09	3.425	3.42	3.441	
1.36	4.142	4.15	4.157	
1.64	4.738	4.75	4.758	
1.91	5.216	5.23	5.24	
2.18	5.573	5.59	5.601	
2.45	5.812	5.83	5.843	
2.73	5.931	5.95	5.963	
3	5.94	5.96	5.97	

Согласно данным, приведенным в табл. 5, был выполнен анализ и построен график зависимости величины напряжения по M_x деревобетонного перекрытия от шага деревянных балок (рис. 19).


 Рис. 18. Зависимость напряжения по M_x от шага балок (справа – увеличенная часть графика)

Исходя из графика (см. рис. 18) можно констатировать, что с увеличением шага балок значения напряжений по M_x увеличиваются, но их величины очень незначительно отличаются друг от друга.

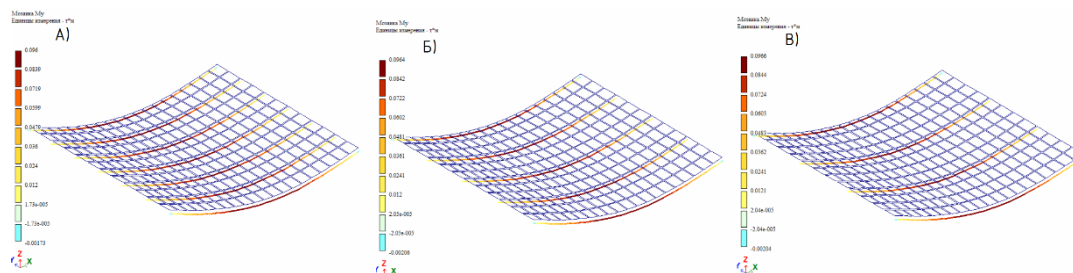


Рис. 19. Изополюсы усилий в стержнях по M_y для деревобетонных перекрытий (шаг балок А – 1 м; Б – 1.5 м; В – 2 м)

Согласно изополюсам усилий в стержнях по M_y , можно говорить о том, что их максимальные значения при действии сочетания нагрузок для деревобетонных перекрытий равны:

- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 1 м
напряжение $F_{\max}$ по $M_y = 0.096$ т·м;
- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 1.5 м
напряжение $F_{\max}$ по $M_y = 0.0964$ т·м;
- для деревобетонного перекрытия с шагом деревянных балок 2 м
напряжение $F_{\max}$ по $M_y = 0.0966$ т·м.

На рис. 20 представлен график зависимости величины прогиба от толщины железобетонной плиты).

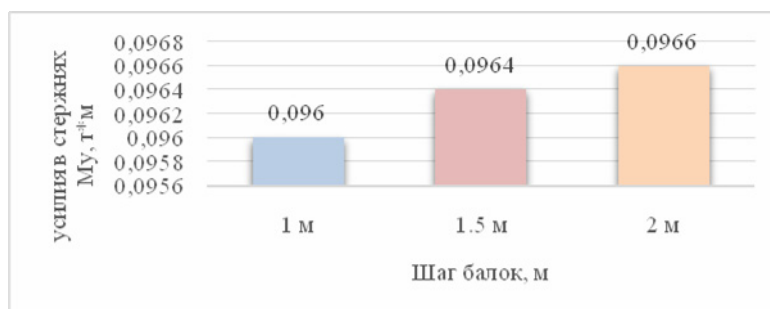


Рис. 20. Зависимость напряжения по M_y от шага деревянных балок

Для анализа составлена таблица (табл. 6) результатов усилий в стержнях по M_y для деревобетонного перекрытия с разным шагом деревянных балок. График строился по степени удаленности от места закрепления перекрытия (удаленность от края перекрытия), то есть минимальное значение было взято у места закрепления балки (удаленность, таким образом, равна 0, и прогиб в этом месте также равен 0), а максимальное значение в его центре. Удаленность от края составила 3 м (так как вся длина перекрытия – 6 м). Так были выписаны значения для трех деревобетонных перекрытий с разным шагом балок.

Т а б л и ц а 6

Усилия в стержнях по M_y при разном шаге балок
(3 варианта шага балок)

Удаленность от края перекрытия, м	Шаг балок, м			
	1 м	1.5 м	2 м	
1	2	3	4	5
0	0	0	0	
0.27	0.00139	0.0016	0.00169	

1	2	3	4	5
0.55	0.0166	0.017	0.0174	Усилия в стержнях по M_y , т·м
0.82	0.0324	0.033	0.0333	
1.09	0.0469	0.047	0.04775	
1.36	0.0596	0.06	0.0601	
1.64	0.0704	0.0706	0.0708	
1.91	0.0793	0.0795	0.0797	
2.18	0.0863	0.0865	0.0867	
2.45	0.0914	0.0916	0.0918	
2.73	0.0945	0.0947	0.0949	
3	0.096	0.0964	0.0966	

Согласно данным, приведенным в табл. 6, был выполнен анализ и построен график зависимости величины усилий в стержнях по M_y от шага деревянных балок (рис. 21).

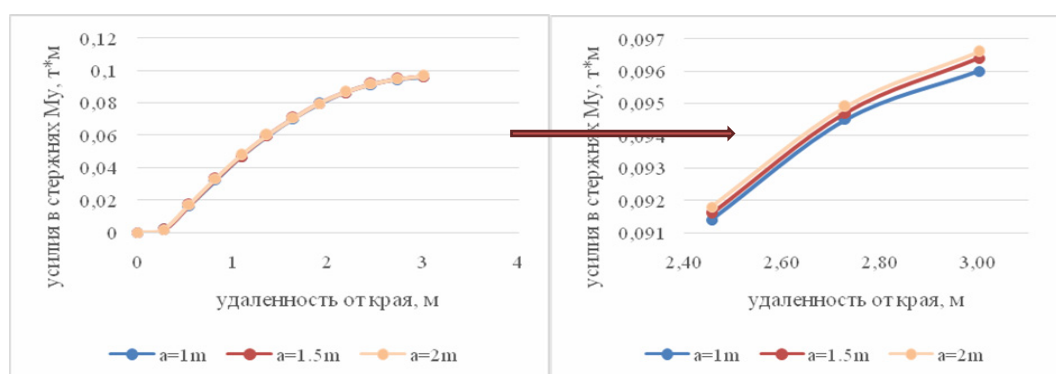


Рис. 21. Зависимость напряжения по M_y от шага балок (справа – увеличенная часть графика)

Исходя из графика (см. рис. 21) можно говорить о том, что с увеличением шага балок значения усилий в стержнях возрастают, но их величины очень незначительно отличаются друг от друга.

В ходе численных исследований изучены особенности напряженно-деформированного состояния деревобетонных перекрытий при изменении шага балок перекрытия и толщины бетонной плиты при эксплуатационных нагрузках.

Выявлены рациональная толщина плиты и рациональный шаг ребер. Сравнение результатов численных экспериментов показывает, что рациональная толщина плиты для перекрытия 6×6 м составляет 15–20 см, а рациональный шаг балок – 1,5 м.

Список литературы

1. Соколов, И.В. Термомодифицированная древесина – инновационный материал XXI века / И.В. Соколов // Эффективные строительные конструкции. Теория и практика : сб. статей XXIII Международной научно-технической конференции. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2023. – 72с.
2. Хантимиров, А.Г. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, усиленные базальтовой фиброй / А.Г. Хантимиров, Л.А. Абдрахманов, Р.К. Низамов, В.Г. Хозин // Известия КГАСУ. – 2022. – №3(61). – С.75–81.
3. Замалиев, Ф.С. Численные исследования деревобетонных балок составного сечения / Ф.С. Замалиев, Э.Ф. Замалиев // Эффективные строительные конструкции. Теория и практика : сб. статей XXIII Международной научно-технической конференции. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2023. – 72 с.
4. Лукичев, А. Гибридные конструкции – новый тренд в зарубежном строительстве / А. Лукичев // ЛесПромИнформ. – 2016. – №8 (122). – С. 106–112.

5. Мельников, Ю.О. Влияние податливости связей на прочность и жесткость деревобетонных мостовых балок / Ю.О. Мельников // Труды Сиб.АД. – 1970. – №3.
6. Мельников, Ю.О. Определение несущей способности объединённых деревобетонных балок / Ю.О. Мельников // Труды Сиб.АД. – 1986. – №1.
7. Über den Autor Baustoffe Wissen. Grundstoffe des Bauens. 2019.
8. Лукичев, А. Будут ли в России деревянные небоскребы? / А. Лукичев // ЛесПромИнформ. – 2015. – №4 (110). – С. 102–116.
9. Aicher, S. Bemessung biegebeanspruchter Sandwichbalken mit dem modifizierten γ -Verfahren / S. Aicher // Bautechnik. – 1987. – 3. – P. 79–86.
10. Blaß, H.-J. Tragund Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen / H.-J. Blaß, J. Ehlbeck, M.L.R. Linden, M. Schlager // Bauenmitholz. – 1996. – 5. – P. 392–399.
11. Brunner, M. Adhesive connection of timber-concrete-composite / M. Brunner, M. Schnüriger // 9th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2006. – Portland, USA, 2006. – P. 171.
12. Fragiocomo, M. The Effect Of Moisture And Temperature Variations On Timber-Concrete Composite Beams / M. Fragiocomo, J. Schänzlin // 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010. – Myasaki, Japan, 2010. – P. 113–120.
13. Хантимиров, А.Г. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов / А.Г. Хантимиров, А.М. Сулейманов, Л.А. Абдрахманова, Р.К. Низамов, О.В. Хохряков // Известия КГАСУ. – 2023. – №3(65). – С.26–35.
14. Исламов, А.М. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, модифицированные аэросилом / А.М. Исламов, Д.А. Габбасов, А.Г. Хантимиров, В.Г. Хозин, Л.А. Абдрахманова, Р.К. Низамов // Известия КГАСУ. – 2016. – №4(48). – С.359–364.
15. Миронова, Ю.В. Напряженно-деформированное состояние сборного железобетонного каркаса при прогрессирующем обрушении / Ю.В. Миронова, В.В. Денисов // ЭНИ “Строительные конструкции, здания и сооружения”. – 2022. – №1(1). – С.4–12.
16. Никитин, Г.П. Применение колонн из высокопрочного сталефибробетона в промышленном строительстве / Г.П. Никитин, Н.А. Башарин // ЭНИ “Строительные конструкции, здания и сооружения”. – 2023. – №4(5). – С.4–10.
17. Шмелев, Г.Н. Действительная работа узлового соединения стойки с ригелем фасадной системы / Г.Н. Шмелев, А.С. Антонов, В.С. Манушин // ЭНИ “Строительные конструкции, здания и сооружения”. – 2024. – №1(6). – С.4–12.

References

1. Sokolov, I.V. Thermally modified wood – an innovative material of the 21st century / I.V. Sokolov // Effective building structures. Theory and practice : collection of articles of the XXIII International Scientific and Technical Conference. – Penza : Privolnsky House of Knowledge, 2023. – 72 p.
2. Khantimirov, A.G. Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride, reinforced with basalt fiber / A.G. Khantimirov, L.A. Abdrakhmanov, R.K. Nizamov, V.G. Khozin // News of KGASU. – 2022. – No. 3(61). – P.75–81.
3. Zamaliev, F.S. Numerical studies of wood-concrete beams of composite section / F.S. Zamaliev, E.F. Zamaliev // Effective building structures. Theory and practice : collection of articles XXIII International Scientific and Technical Conference. – Penza : Privolzhsky House of Knowledge. 2023. 72 p.
4. Lukichev, A. Hybrid structures – a new trend in foreign construction / A. Lukichev // LesPromInform. – 2016. – No. 8 (122). – P. 106–112.
5. Melnikov, Yu.O. Influence of compliance of bonds on the strength and rigidity of wood-concrete bridge beams / Yu.O. Melnikov // Proceedings of Sib.AD. – 1970. – No. 3.
6. Melnikov, Yu.O. Determination of the bearing capacity of the combined wood-concrete beams / Yu.O. Melnikov // Proceedings of Sib.AD. – 1986. – No. 1.

7. Über den Autor Baustoffe Wissen. Grundstoffe des Bauens. 2019.
8. Lukichev, A. Will there be wooden skyscrapers in Russia? / A. Lukichev // LesPromInform. – 2015. – No. 4 (110). – P. 102–116.
9. Aicher, S. Bemessung biegebeanspruchter Sandwichbalken mit dem modifizierten γ -Verfahren / S. Aicher // Bautechnik. – 1987. – 3. – P. 79–86.
10. Blaß, H.-J. Tragund Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen / H.-J. Blaß, J. Ehlbeck, M.L.R. Linden, M. Schlager // Bauen mit Holz. – 1996. – 5. – P. 392–399.
11. Brunner, M. Adhesive connection for timber-concrete-composite / M. Brunner, M. Schnüriger // 9th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2006. – Portland, USA, 2006. – P. 171.
12. Fragiocomo, M. The Effect Of Moisture And Temperature Variations On Timber-Concrete Composite Beams / M. Fragiocomo, J. Schänzlin // 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010. – Myasaki, Japan, 2010. – P. 113–120.
13. Khantimirov, A.G. The influence of modification on the durability of polyvinyl chloride wood-polymer composites / A.G. Khantimirov, A.M. Suleymanov, L.A. Abd-rakhmanova, R.K. Nizamov, O.V. Khokhryakov // Izvestia KGASU. – 2023. – No. 3(65). – P. 26–35.
14. Islamov, A.M. Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride, modified with aerosil / A.M. Islamov, D.A. Gabbasov, A.G. Khantimirov, V.G. Khozin, L.A. Abd-rakhmanova, R.K. Nizamov // News of KGASU. – 2016. – No. 4(48). – P. 359–364.
15. Mironova, Yu.V. Stress-strain state of precast reinforced concrete frame with progressive collapse / Yu.V. Mironova, V.V. Denisov // ESP “Construction, buildings and structures”. – 2022. – No. 1(1). – P. 4–12.
16. Nikitin, G.P. Application of columns made of high-strength concrete reinforced with steel fiber in industrial construction / G.P. Nikitin, N.A. Basharin // ESP “Construction, buildings and structures”. – 2023. – No. 4(5). – P. 4–10.
17. Shmelev, G.N. The actual operation of the nodal connection of the rack with the transom of the facade system / G.N. Shmelev, A.S. Antonov, V.S. Manushin // ESP “Construction, buildings and structures”. – 2024. – No. 1(6). – P. 4–12.

УДК 624

DOI 10.54734/20722958_2025_2_143

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

Мартышкин Даниил Олегович,
ассистент кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: historical95@mail.ru

Залилов Илья Вадимович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: zalilov.ilya@yandex.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

Martyshkin Daniil Olegovich,
Assistant of the department «Building
Structures»

E-mail: historical95@mail.ru

Zalilov Ilya Vadimovich,
Postgraduate of the department «Building
Structures»

E-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

Ariskin Maxim Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building Structures»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ БОЛТОВ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.О. Мартышкин, И.В. Залилов, М.В. Арискин

Для обеспечения коррозионной стойкости и прочности соединений деревянных конструкций в объектах с агрессивной средой необходимо применять композитные механические связи, а также болтовые комплекты из композитов. Представляются результаты испытаний образцов стеклопластиковых болтов для соединений деревянных конструкций. Для обеспечения однородности стеклопластиковой шпильки предлагается использовать направленные стекловолокна.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, стеклопластиковый болт, несущая способность, критерий разрушения, смола, отвердитель

BEARING CAPACITY OF FIBERGLASS BOLTS CONNECTING WOODEN STRUCTURES

D.O. Martyshkin, I.V. Zalilov, M.V. Ariskin

To ensure corrosion resistance and strength of wooden structures joints in objects with an aggressive environment, it is necessary to use composite mechanical bonds, and bolt sets made of composites. Fiberglass bolts are offered for connecting wooden structures. The test results of the samples, bearing capacity and fracture criteria of fiberglass bolts are presented. To ensure the uniformity of the fiberglass stud it is proposed to use directional glass fibers.

Keywords: wooden structures, connection, fiberglass bolt, bearing capacity, criterion of destruction, resin, hardener

Введение

В строительстве наиболее эффективно древесина используется в мало- и большепролетных зданиях и сооружениях, а также при строительстве индивидуальных и многоэтажных домов [1]. Древесина обладает высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред. В связи с чем деревянные несущие конструкции нашли применение в объектах с высокой влажностью (бассейны, хоккейные стадионы, объекты сельского хозяйства и химической промышленности).

Для обеспечения коррозионной стойкости и прочности соединений деревянных конструкций в объектах с агрессивной средой необходимо применять композитные механические связи: клеенные шайбы из стеклопластиков и стеклотекстолитов [2, 3], пластиков [4], а также нагели [5–7] и болтовые комплекты. Предложены болтовые соединения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) [8]. Следует отметить, что использование пластиковых (полимерных) болтов позволяет повысить коррозионную стойкость соединения, однако вместе с этим появляется вопрос податливости соединения за счет текучести пластиков, а также достаточно низкой стойкости к термическому воздействию. В связи с этим предлагается использовать композитные материалы на основе термореактивных смол и стеклопластиковой арматуры (волокон), что позволит повысить жесткость и несущую способность болтов.

Выполнены натурные испытания стеклопластиковых стрижней на срез, установлена удовлетворительная несущая способность, которая составила 20,44 кН [9]. Также выявлено, что нарезать полноценную резьбу на данных образцах не представляется возможным: были отмечены значительные сколы верхнего слоя смолы, вероятно, связанные с большим количеством пузырей воздуха в массиве смолы и низкой трещиностойкостью смолы без армирования. В связи с этим был выполнен поиск возможности понижения вязкости состава.

Далее на основе натурных испытаний необходимо определить несущую способность (НС) стеклопластиковых болтов/шпилек с резьбой для применения стеклопластиковых болтов в соединениях деревянных конструкций.

Методика проведения испытаний стеклопластиковых шпилек

Диаметр болта D_b принят равным 16 мм (на основании ранее проведенных испытаний образцов с клееными стеклопластиковыми шайбами [2, 3] и стержнями [9]). В качестве материалов для стеклопластикового болта приняты смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) и стеклопластиковая арматура (ГОСТ 31938-2012). Следует отметить, что в качестве отвердителя использовался Этал-45М – нетоксичный отвердитель аминного типа.

Характеристики компаунда ЭД 20+Этал 45М представлены в табл.1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики компаунда ЭД 20+Этал 45М

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Величина
1	Время жизни в массе 200 г при $T=(20\pm 2)^\circ\text{C}$	мин	50
2	Вязкость по вискозиметру ВЗ-4	с	130-400
3	Прочность при растяжении, не менее	МПа	70
4	Прочность при изгибе, не менее	МПа	120
5	Прочность при сжатии, не менее	МПа	130
6	Относительное удлинение, ер., не менее	%	4
7	Ударная вязкость по Шарпи, не менее	кгс·см/см ²	15
8	Твердость по Бринеллю, не менее		20
9	Теплостойкость по Мартенсу, не менее	°C	110
10	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, не менее	Ом	1×10^{14}
11	Водопоглощение, не более	%	0,03
12	Изменение веса в концентрированных щелочах за 400 часов	%	0,2
13	Изменение веса в 20 % соляной кислоте за 400 часов	%	0,2
14	Изменение прочности при изгибе в концентрированных щелочах за 400 часов, %	%	0
15	Изменение прочности при изгибе в 20 % соляной кислоте за 400 часов	%	3

Основными преимуществами отвердителя Этал-45М по сравнению с полиэтилен-полиаминами (ПЭПА) являются: возможность отверждения при низких температурах (от -7°C) и высокой влажности, повышенная жизнеспособность при одинаковом времени отверждения смолы. За счет относительно низкой температуры экзотермической реакции возможна заливка большими объемами. Использование Этал-45М снижает вязкость эпоксидной смолы, поэтому в нее не требуется добавлять разбавители и пластификаторы, сильно снижающие прочность, водостойкость и теплостойкость отвержденного компаунда.

Отвердитель Этал-45М, в отличие от ПЭПА, не токсичен и не вызывает дерматитов при попадании на кожу. Он не обладает таким резким и неприятным запахом, как ПЭПА.

Болты изготавливались в лаборатории кафедры «Строительные конструкции» ПГУАС. Заливка стеклопластиковой арматуры осуществлялась в пластиковой опалубке [9]. Резьба выполнялась плашкой (рис. 1). Общий вид стеклопластикового болта показан на рис. 2.

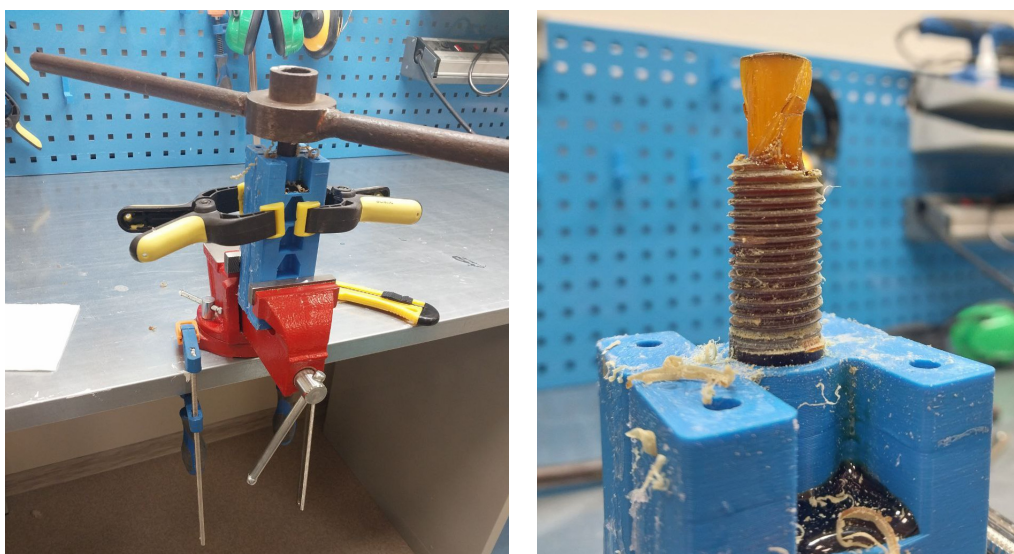


Рис. 1. Выполнение резьбы стеклопластикового болта



Рис. 2. Общий вид стеклопластиковой шпильки

Образцы испытывались на срез по схеме, при которой нагружение производилось через металлические накладки, передающие усилия на стеклопластиковый стержень по аналогии с ранее проведенными испытаниями [9] (рис. 3).

Образцы испытывались 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 [9]. На основе ранее испытанных образцов с клееными стеклопластиковыми шайбами и стеклопластиковых стержней [9] передача нагрузки на образцы осуществлялась непрерывно 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.



Рис. 3. Испытание образцов: образец в гидравлическом прессе П-500

На начальном этапе нагружение образцов производилось до 10 кН для обжатия стержня и исключения появления рыхлых деформаций. После чего нагрузка сбрасывалась до 0. Далее образцы нагружались до полного разрушения. Следует отметить, что при нагружении до 5 кН производится автоматическая тарировка прессы, при которой перемещения незначительны (либо равны 0, либо близки к этому значению), что объясняется технологической особенностью прессы.

Результаты испытаний

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки приведены в табл. 2, графики нарастания деформаций сдвига представлены на рис. 4.

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки

Марка образца	Диаметр болта D , мм	Скорость нагружения, кН/мин	Разрушающая нагрузка $P_{\text{разр}}$, кН	Средняя разрушающая нагрузка $P_{\text{разр}}$, кН
Бр-1.1	16	2	24,83	25,47
Бр-1.2			25,38	
Бр-1.3			25,54	
Бр-1.4			30,12	
Бр-1.5			26,12	

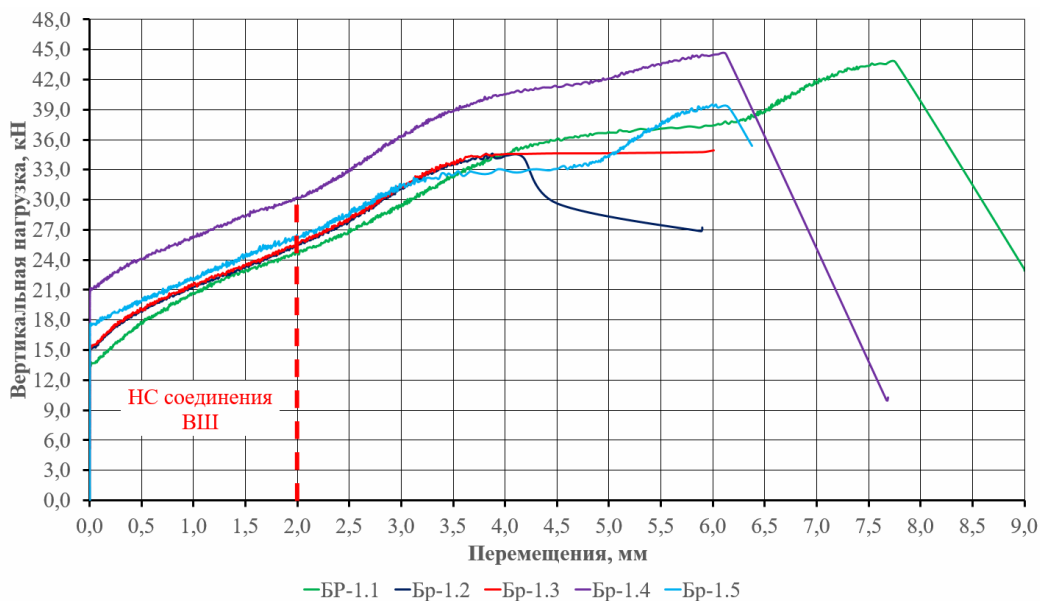


Рис. 4. Деформации сдвига стеклопластиковых шпилек

В табл. 2 представлена разрушающая нагрузка $P_{\text{разр}}$ образцов. Величины $P_{\text{разр}}$ образцов Бр-1.4 значительно отличаются от данных величин других образцов. На этом основании не учитываем результаты разрушающей нагрузки образцов Бр-1.4 (см. рис. 4 и табл. 2).

Согласно рис. 4, при нагрузке, не превышающей 17,5 кН, величина деформаций недостаточна для фиксации силоизмерителем прессы. После начинают возникать деформации сдвига (по аналогии с пилотными испытаниями стеклопластиковых стержней [9]). Далее происходит смятие шайбы под центровым болтом до включения в работу композитной арматуры. Смятие шпильки сопровождается растрескиванием наружного слоя смолы. Нагружение образцов продолжалось до полного разрушения. Общий вид разрушения образцов показан на рис. 5. Общее разрушение образца сопровождалось интенсивным ростом деформаций сдвига без заметного увеличения нагрузки на сравнительно большом промежутке времени.

За разрушающую нагрузку (несущую способность) принимаем такую величину, при которой деформации сдвига не превышают 2,0 мм по аналогии с испытаниями соединений на клеенных стеклопластиковых шайбах [5], что соответствует графику при деформациях от 0 до 2 мм. Наблюдается линейный рост нагрузки и деформаций (упругая работа). После 2 мм отмечен перегиб на графике, что подтверждает переход в пластическую работу материала.

В качестве критерия разрушения принято полное разрушение стержня.



Рис. 5. Общий вид разрушения стеклопластиковых болтов

Как отмечено ранее, разрушающую нагрузку образца Бр 1.4 не учитываем. Средняя разрушающая нагрузка составила 25,47 кН. Средняя величина напряжений в арматурном стержне (при поперечном срезе) составляет 225,32 МПа, что превышает величину предела прочности при поперечном срезе для стеклокомпозитной арматуры (150 МПа) по ГОСТ 31938-2012. Увеличение разрушающей нагрузки образцов объясняется более высокими физико-механическими свойствами компаунда ЭД 20 + Этал 45М по сравнению с ЭД 20 + ТЭТА/ПЭПА.

При выполнении резьбы отмечена достаточно высокая вероятность скалывания смолы. В связи с этим планируется изготовить и испытать образцы с добавлением рубленого стекловолокна. Это позволит повысить прочность смолы, залитой вокруг стеклопластиковой арматуры, и увеличить трещиностойкость.

В качестве полного отказа от использования готовой стеклопластиковой арматуры планируется изготовить и испытать стеклопластиковый болт/шпильку с использованием направленных стекловолокон. Монолитная заливка обеспечит гомогенность изделия ввиду отсутствия заливаемого слоя поверх готовой арматуры.

Несмотря на то, что вариант использования смолы ЭД-20 с отвердителем Этал-45М показал низкую склонность к образованию пузырей воздуха в массиве смолы, ожидается, что при применении стекловолокон потребуется дегазатор.

Выводы

1. На основании натурных испытаний стеклопластиковых шпилек/болтов на срез установлена удовлетворительная несущая способность, которая составила 25,47 кН, что подтверждает их практическую применимость в деревянных конструкциях, а именно в соединениях с использованием клеенных шайб из композитных материалов, для обеспечения коррозионной стойкости, немагнитности и радиопрозрачности узла.
2. Установлен факт возможности создания полноценной резьбы на эпоксидной смоле. Отмечены незначительные сколы резьбы.
3. Для обеспечения однородности стеклопластиковой шпильки предложено использование направленных стекловолокон вместо композитной арматуры.

Список литературы

1. Коклюгина, Л.А. Современные технологии возведения многоэтажных деревянных домов / Л.А. Коклюгина, А.В. Коклюгин, А.Р. Гимранов, А.Г. Никифоров // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – №1(47). – С. 231–238.
2. 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.
3. 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.
4. Арискин, М.В. Аддитивные технологии в изготовлении шайб соединений деревянных конструкций / М.В. Арискин, И.В. Залилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 144–151.
5. Умнова, О.В. Несущая и деформационная способность стеклопластиковых нагельных соединений в деревянных конструкциях с учетом времени и температуры эксплуатации / О.В. Умнова, В.П. Ярцев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2007. – Т.13, №4. – С. 974–982.
6. Водяников, М.А. Деформативность и несущая способность узлов стыка деревянных конструкций на стальных и углепластиковых нагелях / М.А. Водяников, Г.Г. Кашеварова, П.С. Штро // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 2. – С. 50–56.
7. Кашеварова, Г.Г. Композитные решения стыков клееных деревянных конструкций / Г.Г. Кашеварова, М.А. Водяников // Фундаментальные, поисковые и

прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году : сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. Москва, 2018. – С. 247–253.

8. Кузнецов, И.Л. Болтовое соединение в стержневых конструкциях из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) / И.Л. Кузнецов, Д.Н. Арипов, А.Э. Фахрутдинов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – №4(46). – С. 200–207.

9. Мартышкин, Д.О. Стеклопластиковые болты соединений деревянных конструкций / Д.О. Мартышкин, М.В. Арискин, И.В. Залилов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2024. – №2(19) – С. 31–36.

References

1. Koklyugina, L.A. Modern technologies for the construction of multi-storey wooden houses / L.A. Koklyugina, A.V. Kalugin, A.R. Gimranov, A.G. Nikiforov // Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2019. – №1(47). – P. 231–238.

2. 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.

3. 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.

4. Ariskin, M.V. Additive technologies for making washers of wooden structure connections / M.V. Ariskin, I.V. Zalilov // Regional architecture and engineering – 2023. – No 3 (56). – P. 144–151.

5. Umnova, O.V. Bearing and deformation ability of fiberglass nagel joints in wooden structures, taking into account the time and temperature of operation / O.V. Umnova, V.P. Yartsev // Bulletin of the Tambov State Technical University. – 2007. – Vol. 13, No.4. – P. 974–982.

6. Vodyannikov, M.A. Deformability and bearing capacity of joints of wooden structures on steel and carbon fiber nails / M.A. Vodyannikov, G.G. Kashevarova, P.S. Shtro // Modern technologies in construction. Theory and practice. – 2017. – Vol. 2. – P. 50–56.

7. Kashevarova, G.G. Composite solutions for joints of glued wooden structures / G.G. Kashevarova, M.A. Vodyannikov // Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017 : Collection of scientific papers of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. Moscow, 2018. – P. 247–253.

8. Kuznetsov, I.L. Bolted connection in core structures made of pultrusion fiberglass profiles (PSP) / I.L. Kuznetsov, D.N. Aripov, A.E. Fakhrutdinov // Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2018. – №4(46). – P. 200–207.

9. Martyshkin, D.O. Fiberglass bolts of joints of wooden structures / D.O. Martyshkin, M.V. Ariskin, I.V. Zalilov // Vestnik PGUAS: construction, science and education. – 2024. – №2(19) – P. 31–36.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Быков Александр Николаевич,
аспирант кафедры «Механика»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Bykov Aleksandr Nikolaevich,
Postgraduate student of the Department
«Mechanics»

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ «СООРУЖЕНИЕ – ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВЯЗИ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

А.И. Шеин, А.Н. Быков

Построена математическая модель расчета железобетонной рамной системы с перекрестными связями путем приведения исходной рамы к одностоечной динамической схеме, оборудованной тросовыми или трубчатыми демпферами. Представлена математическая модель аналитического решения задачи сейсмического расчета путем представления акселерограммы совокупностью аппроксимирующих гармоник. Приведены результаты численного расчета одностоечной системы с тросовыми и трубчатыми связями.

Ключевые слова: колебания, сейсмическая защита, сейсмограмма, перекрестные демпфирующие связи, дифференциальные уравнения движения

EQUATIONS OF MOTION «STRUCTURE – CROSS-LINKING DAMPING CONNECTIONS» FOR SEISMIC DISTURBANCES

A.I. Shein, A.N. Bykov

A mathematical model for calculating a reinforced concrete frame system with cross-links is constructed by reducing the initial frame to a single-column dynamic circuit equipped with cable or tubular dampers. A mathematical model of the analytical solution of the seismic calculation problem is constructed by representing an accelerogram with a set of approximating harmonics. The results of numerical calculation of a single-column system with cable and tubular connections are presented.

Keywords: vibrations, seismic protection, seismogram, cross-damping connections, differential equations of motion

В последние годы формируется направление гашения колебаний зданий и сооружений в виде применения энергопоглощающих материалов и устройств [1–7]. Это такие приемы, как использование полимеркомпозитных материалов, сплавов с памятью формы, многослойных пластин из металлического волокна с демпфирующими слоями.

Развитие полимерных и наноматериалов открывает новые возможности для повышения демпфирующих характеристик вязкоупругих демпферов. Перспективным видится развитие реактивного способа активного гашения колебаний. Так, в работах [8–12] дан анализ работы ленточно-тросовых гасителей при сейсмических нагрузках. При этом моделировались перекрестные системы с тросами и гидроцилиндрами одностороннего действия, а для решения исходных систем уравнений движения применялись прямые шаговые методы. В настоящем исследовании разбирается

методика построения, упрощения и решения системы дифференциальных уравнений движения при кинематическом возбуждении колебаний.

Математическая модель и расчетные соотношения. Рассмотрим математическую модель «сооружение – гаситель» в условиях возмущающих воздействий сейсмического характера. Будем полагать, что упругие характеристики сооружения определяются матрицей жесткости K , а инерционные свойства – диагональной (узловой) матрицей масс M . Гаситель должен создавать знакопеременные силы сопротивления движению

$$R_i = -\alpha \cdot \dot{u}_i, \quad (1)$$

препятствующие колебательным движениям здания или сооружения.

Здесь α – коэффициент сопротивления движению; $\dot{u}_i$ – скорость движения поршня. Современные методы создания демпфирующих составов на основе нанотехнологий позволяют получать жидкости с заданными свойствами сопротивления движению, мало зависящими от температуры среды, что очень важно при практическом применении.

При устройстве перекрестной системы связей возможны две основные схемы демпфирующих гидроцилиндров: ленточно-тросовая с гидроцилиндрами одностороннего действия (рис. 1,а) и жесткая трубчатая с жесткими штоками и гидроцилиндрами двухстороннего действия (рис. 1,б).

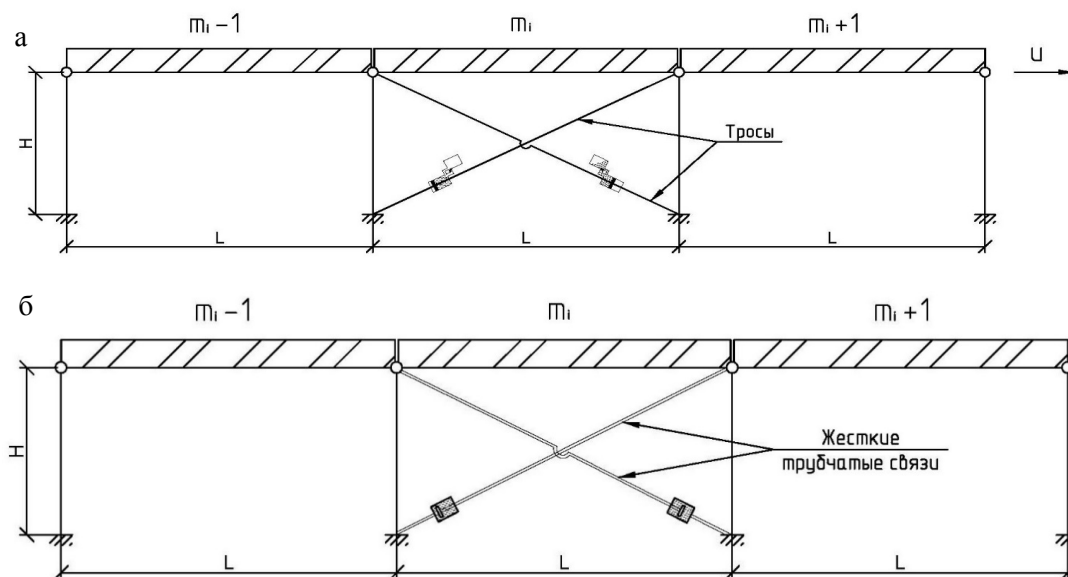


Рис. 1. Продольный разрез промышленного каркаса

Данные системы перекрестных связей можно представить простыми моделями, показанными на рис. 2, 3. В первом случае (см. рис. 2) для непрерывного демпфирования механической системы жесткостью K с колеблющейся массой M необходимы два троса T_1 и T_2 , два гидроцилиндра Π_1 и Π_2 с отверстиями O_1 и O_2 , возвратные пружины Π_1 и Π_2 , вспомогательные емкости E_1 и E_2 , оборудованные обратными клапанами. Приведенная жесткость колонны (см. рис.2) может быть определена из соотношения

$$E_{\text{пр}} I = \sum_{i=1}^k E_{\text{пр},i} I_i,$$

где $E_{\text{пр},i}$ – приведенные модули упругости колонн ряда, I_i – моменты инерции этих колонн, k – количество колонн ряда.

Приведенная масса покрытия

$$m = \sum_{i=1}^k m_i.$$

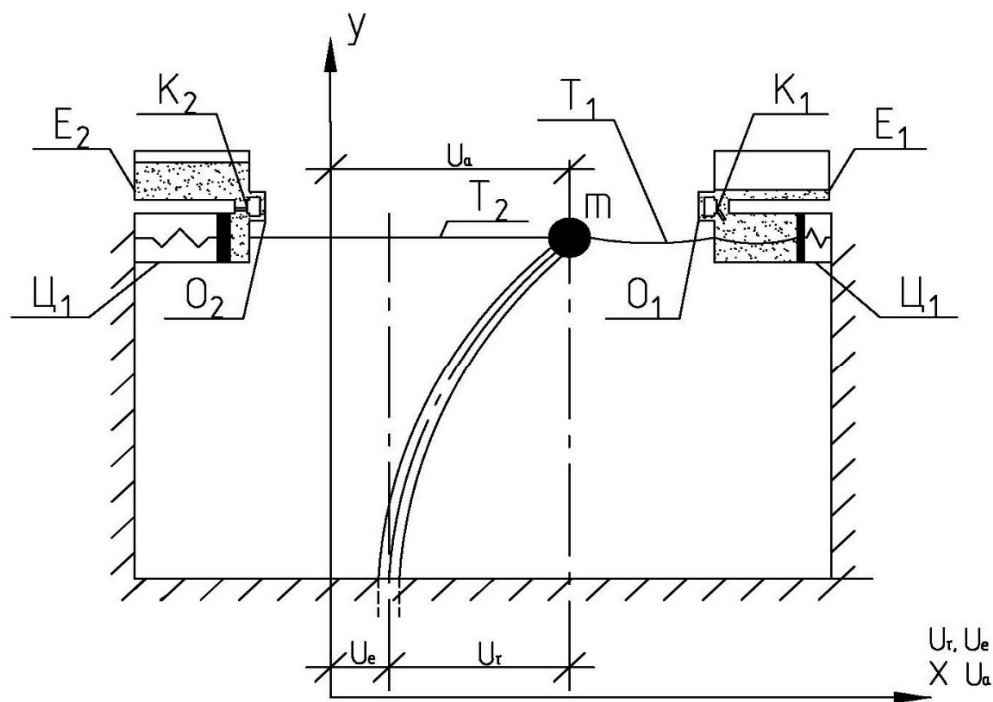


Рис. 2. Эквивалентная модель рамы с тросовыми связями

Во втором случае (см. рис. 3) предполагается, что гидроцилиндр состоит из заполненного вязкой жидкостью цилиндра Ц с отверстиями О, в котором движется поршень П. Поршень соединен жестким штоком Ш с защищаемой механической системой С жесткостью К. Основание цилиндра жестко закреплено с ядром жесткости здания или с основанием.

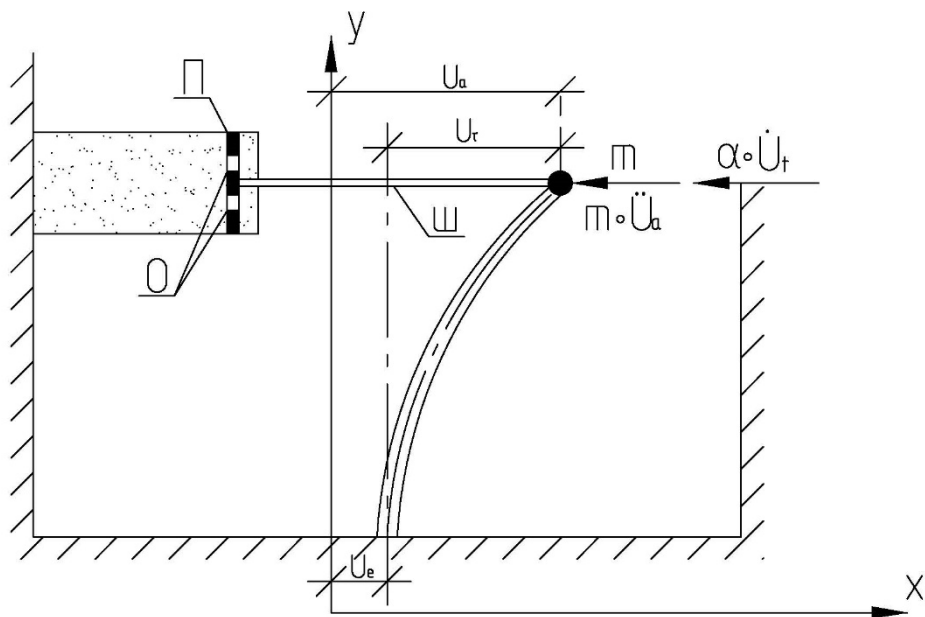


Рис. 3. Эквивалентная модель рамы с трубчатыми связями

$$\alpha = \frac{1256\mu l A_p^2}{\pi d^4}, \text{ Па}\cdot\text{с}. \quad (2)$$

Здесь μ – коэффициент вязкости; l – длина отверстия; A_p – площадь поршня; d – диаметр отверстия. Например, для глицерина при 20°C коэффициент вязкости $\mu = 1480 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, а при 0°C $\mu = 12100 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Уравнение движения

$$U_a = U_\tau + U_e, \quad (3)$$

выражающее связь между абсолютным перемещением приведенной массы, переносным сейсмическим смещением и относительным перемещением изгиба колонны, перепишем с учетом зависимости этих перемещений от силовых воздействий:

$$U_\tau = \delta_{11}(-m \cdot \ddot{U}_a - \alpha \cdot \dot{U}_\tau \cos^2 \beta). \quad (4)$$

Здесь δ_{11} – перемещение от единичной силы в направлении U ; β – угол наклона связей к горизонтали.

Для относительного движения, связанного с изгибом колонн, получим:

$$\ddot{U}_\tau + 2n \cdot \dot{U}_\tau + \omega^2 U_\tau = -\ddot{U}_e. \quad (5)$$

Здесь

$$n = \alpha \cos^2 \beta / (2m) \quad (6)$$

есть коэффициент затухания, $\ddot{U}_e$ – переносное ускорение, принятое, например, по акселерограмме, ω – частота свободных колебаний,

$$\omega = \frac{1}{\delta_{11}m}. \quad (7)$$

Разобьем акселерограмму на малые участки, на которых движение можно приближенно представить в виде гармоник с частотой кинематического возмущения θ_i :

$$\ddot{U}_{e,i} = \ddot{U}_{0,i} \cdot \sin(\theta_i t). \quad (8)$$

Тогда в случае малого сопротивления ($n < \omega$) общее решение дифференциального уравнения на i -м шаге по синусоидам примет вид:

$$U_{\tau,i} = e^{-nt} (A \cos(\omega_i \cdot t) + B \sin(\omega_i \cdot t)) + A_D \sin(\theta_i t - \varepsilon_i). \quad (9)$$

Здесь сдвиг фазы вынужденных колебаний по отношению к фазе кинематических возмущений ε_i определяется из соотношений:

$$\frac{\omega^2 - \theta_i^2}{\sqrt{(\omega^2 - \theta_i^2)^2 + 4n^2 \theta_i^2}} = \cos \varepsilon_i, \quad (10,11)$$

$$\frac{2n\theta_i}{\sqrt{(\omega^2 - \theta_i^2)^2 + 4n^2 \theta_i^2}} = \sin \varepsilon_i,$$

$$\pi \geq \varepsilon \geq 0, \quad (12)$$

а динамическая амплитуда и частота затухающих колебаний

$$A_D = \frac{\ddot{U}_{0,i}}{\sqrt{4n^2\theta_i^2 + (\omega^2 - \theta_i^2)^2}}, \quad (13)$$

$$\omega_1 = \sqrt{k^2 - n^2}. \quad (14)$$

При $t = 0$ $U_\tau = U_{\tau 0} = 0, \dot{U}_\tau = \dot{U}_{\tau 0} = 0$.

При $t = t_i$ $U_{\tau,i} = U_{\tau,i0} = U_{\tau,i-1}, \dot{U}_{\tau,i} = \dot{U}_{\tau,i0} = \dot{U}_{\tau,i-1}$.

Тогда на i -м шаге по синусоидам получим:

$$U_{\tau,i} = e^{-nt} ((U_{\tau,i-1} + A_D \sin \varepsilon_i) \cos(\omega_1 \cdot t) + (\dot{U}_{\tau,i-1} + nU_{\tau,i-1} + A_D(n \sin \varepsilon_i - \theta \cos \varepsilon_i)) \frac{1}{\omega_1} \sin(\omega_1 \cdot t)) + A_D \sin(\theta_i t - \varepsilon_i). \quad (15)$$

Для перекрестной системы с жесткими (трубчатыми) связями (см. рис. 3) движение осуществляется все время по уравнению (5). Для перекрестной системы связей с тросами в условиях

$$|U_{\tau,t+\Delta t}| - |U_{\tau,t}| > 0 \quad (16)$$

движение осуществляется по уравнению (5). При невыполнении условия (16) движение происходит по уравнению

$$\ddot{U}_\tau + \omega^2 U_\tau = -\ddot{U}_e, \quad (17)$$

т.е. в условиях отсутствия сопротивления движению в гидроцилиндрах (холостой ход).

Гидроцилиндры могут включаться в работу при превышении растягивающего усилия некоторого заданного значения, связанного, например, с прочностью перекрестных связей, т.е. при

$$N \geq [N_{\text{доп}}], \quad (18)$$

где $[N_{\text{доп}}]$ – допускаемое усилие натяжения троса с закрытыми отверстиями в гидроцилиндрах или в поршнях гидроцилиндров. При выполнении условия (18) происходит расломбирование гидроцилиндров и начинается демпфированное движение.

Численные исследования. Расчет выполнялся по акселерограмме землетрясения, произошедшего 25.05.2001 в 105 км юго-восточнее тихоокеанского побережья острова Итуруп и оцененного в 8 баллов по MSK-64 (рис. 4).

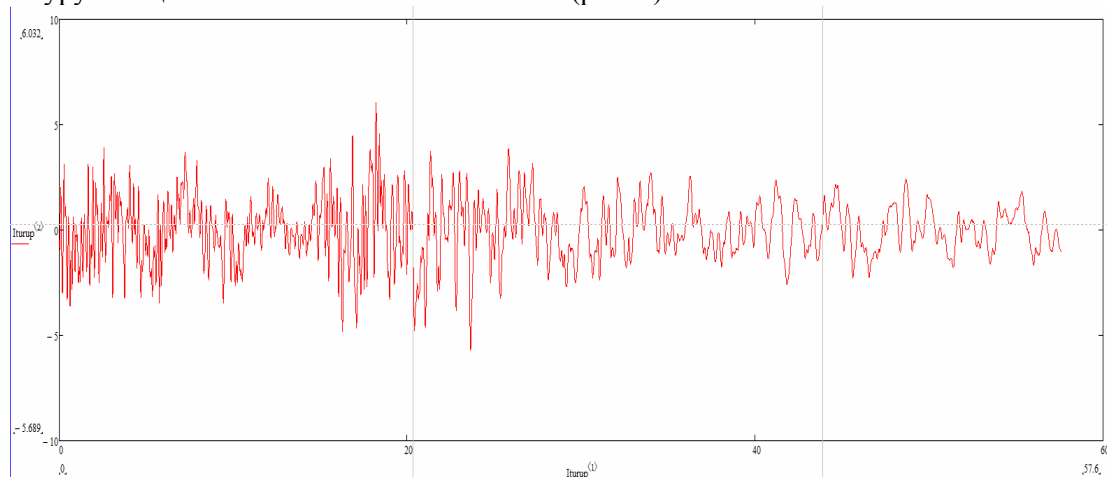


Рис. 4. Акселерограмма землетрясения

Исходные данные для численного расчета (трехпролетная рама с системой перекрестных связей заменена одной стойкой): $\alpha = 1,196 \cdot 10^4$ Па·с, $E = 2,7 \cdot 10^{10}$ Па, $I = 4 \cdot 1,6947 \cdot 10^{-3}$ м², $M = 87520$ кг.

Расчет выполнялся методом центральных разностей с шагом по времени $\Delta t = 0,0005$ с в течение промежутка времени 50 с. Результаты расчета для системы с жесткими трубчатыми связями показаны на рис. 5:

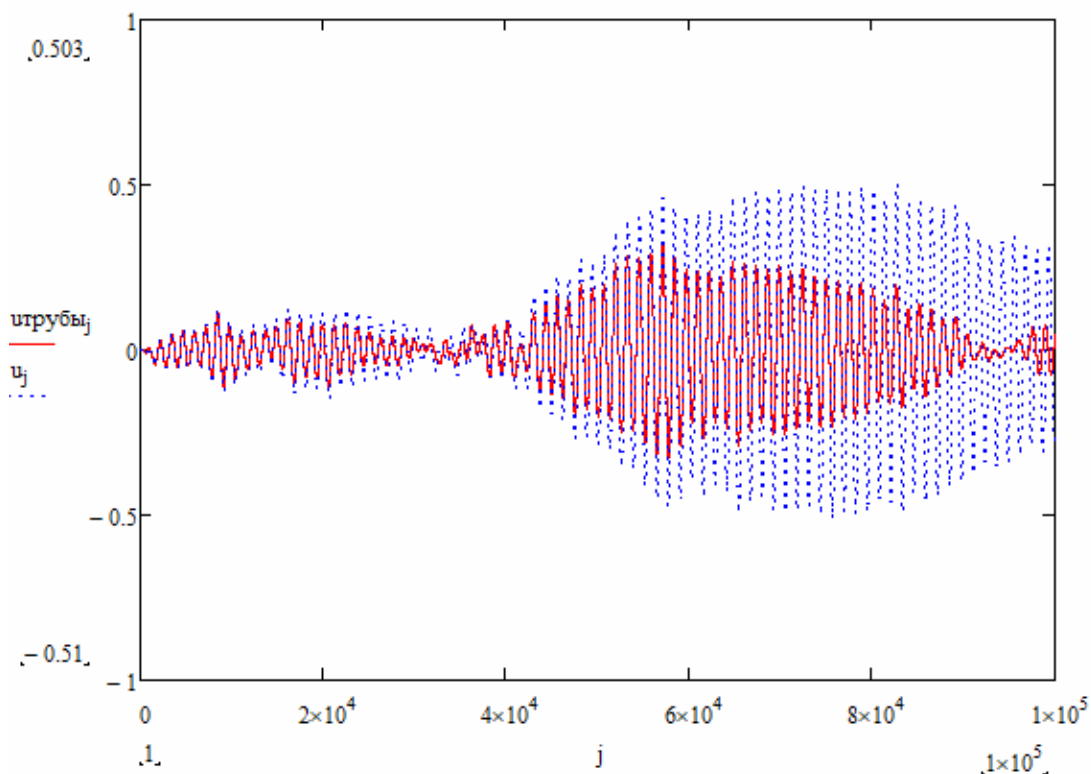


Рис. 5. Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (красный цвет) и для системы без связей (синий цвет)

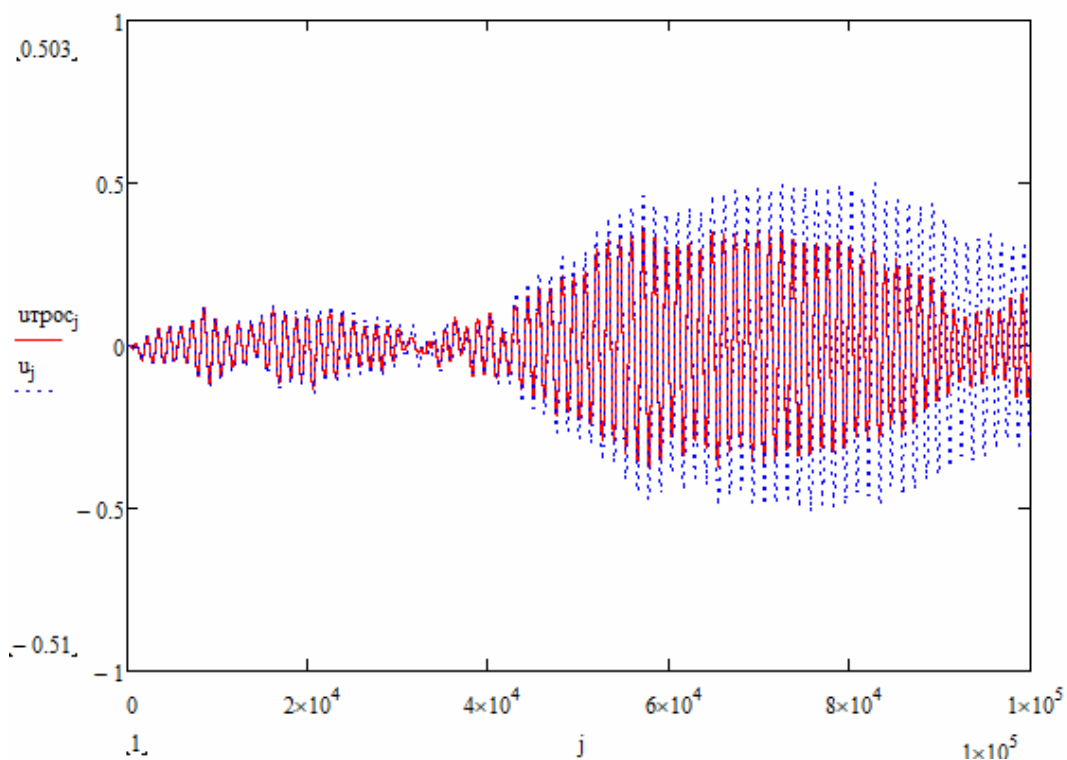


Рис.6. Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (красный цвет) и для системы без связей (синий цвет)

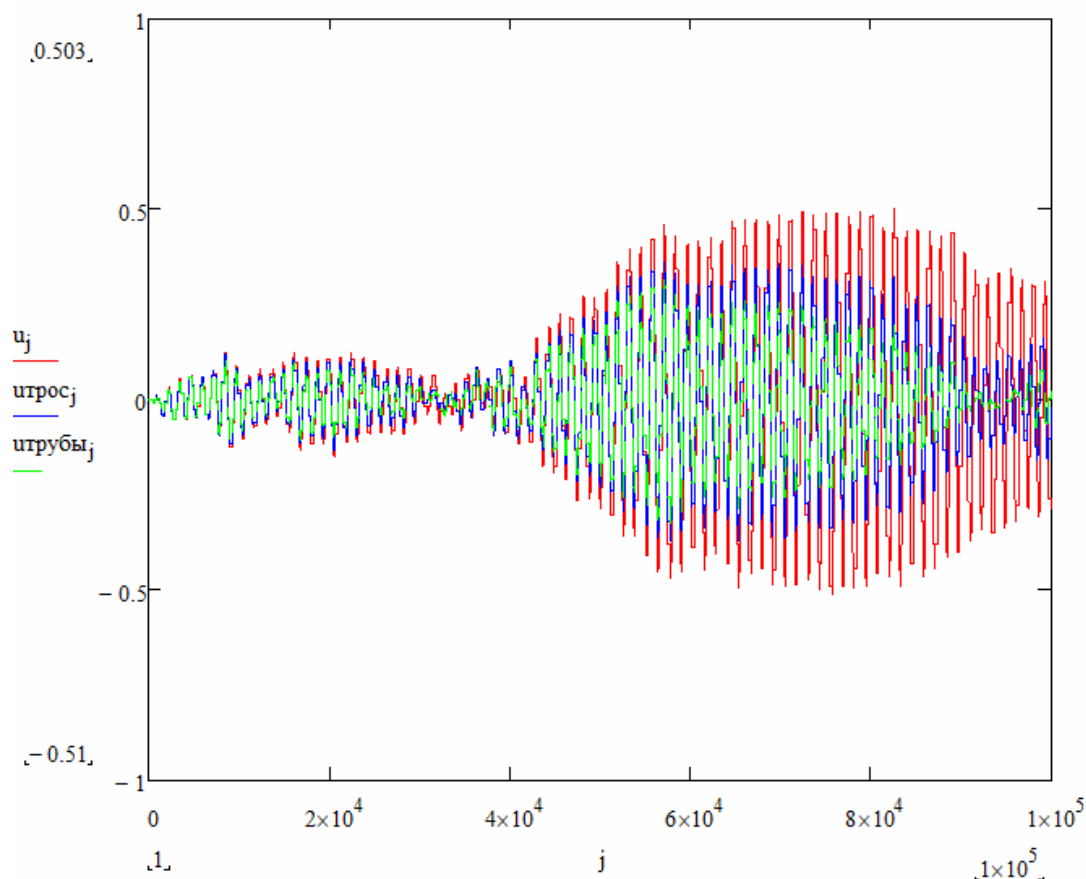


Рис. 7. Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (зеленый цвет), для системы с тросами (синий цвет) и для системы без связей (красный цвет)

Выводы. Построена математическая модель расчета железобетонной рамной системы с перекрестными связями путем приведения исходной рамы к одностоечной динамической схеме, оборудованной тросовыми или трубчатыми демпферами. Приведены результаты численного расчета одностоечной системы с тросовыми и трубчатыми связями. Сопоставление показывает близкие значения демпфированных перемещений с небольшим преимуществом трубчатой системы. Однако нужно отметить, что тросовая система связей более надежна в эксплуатации, нежели трубчатая.

Список литературы

1. Денисов, Е.В. Динамический гаситель колебаний длинномерных конструкций балочного типа / Е.В. Денисов, С.А. Фоменко // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – 2014. – Выпуск 8. – URL: [http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/3488/Денисов %20Е. %20В. %20Динамический %20гаситель %20колебаний.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/3488/Денисов%20Е.%20В.%20Динамический%20гаситель%20колебаний.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
2. Катпин, А. Краткий обзор устройств гашения колебаний / А. Катпин, Мойзес // XX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». – Томск : Томский политехнический университет, 2014.
3. Froozanfar, Mohammad. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art / Mohammad Froozanfar, Saber Moradi, Reza Kianoush, Matthew S. Speicher, Luigi Di Sarno // Journal of Building Engineering. – May 2024. – Vol. 84, 1. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>
4. Yang, Kai. Frame jack-enhanced viscous damping approach for efficient seismic response mitigation of airport control towers / Kai Yang, Zhenhua Xu, Yijia Ma, Minjun

Wu, Zhipeng Zhao, Chao Luo // Structures. – August 2024. – Vol. 66. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424010117>

5. Burtseva, O.A. Roller Seismic Impact Oscillation Neutralization System for High-rise Buildings / O.A. Burtseva, A.N. Tkachev, S.A. Chipko // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039302?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d74c92eac29e313

6. Zoccolini, L. Fluid Viscous Dampers for seismic protection of bridges: a State of the Art / L. Zoccolini, E. Bruschi, C. Pettoroso, D. Rossi, V. Quaglini // Procedia Structural Integrity. – 2024. – Vol. 62. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624006784>

7. Abd-Elhamed, Ayman. Tuned liquid damper for vibration mitigation of seismic-excited structures on soft soil / Ayman Abd-Elhamed, Mohamed Tolan // Alexandria Engineering Journal. – December 2022. – Vol. 61, Issue 12. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822002253>

8. Shein, A.I. Modified method of variable elasticity parameters for solving problems of dynamics of rod systems taking into account physical and geometric nonlinearities / A.I. Shein, A.V. Chumanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 960, 5th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium – WMCAUS 15-19 June 2020, Prague, Czech Republic 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 960 042066. Scopus

9. Шеин, А.И. Определение параметров ленточно-тросового гасителя с торсионном или гидроцилиндром одностороннего действия / А.И. Шеин, А.В. Чуманов, О.Г. Земцова. – DOI: https://doi.org/10.54734/20722958_2023_2_69, RSCI // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 69–76. – Свидетельство о регистрации ПИ ФС77-25956 от 13 октября 2006 г. – ISSN 2072-2958. – URL: <https://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/3136/Nomer%2055.pdf?sequence=1&isAllowed=y>;

10. Shein, A.I. Tape system for damping vibrations of mesh domes with a central mount for seismic impacts / A.I. Shein., A.V. Chumanov // International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction / BuildInTech BIT 2020. Innovations and Technologies in Construction. – P.100–107. Scopus

11. Shein, A.I. Belt Vibration Damping System for Closed-Type Domes / A.I. Shein, A.V. Chumanov // Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE, vol. 160. P. 245-252(2021). Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future, Lecture Notes in Civil Engineering 160. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_33. Scopus

12. Шеин, А.И. Система перекрестных связей производственных цехов на основе ленточно-тросовых гасителей с гидроцилиндрами одностороннего действия при сейсмических воздействиях / А.И. Шеин, В.А. Чуманов. – DOI: https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_143 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №2 (59). – P. 143–148.

References

1. Denisov, E.V. Dynamic vibration dampener for long-length beam-type structures / E.V. Denisov, S.A. Fomenko // Mechanics. Scientific research and educational and methodological developments. – 2014. – Issue 8. – URL: <http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/3488/Денисов%20Е.%20В.%20Динамический%20гаситель%20колебаний.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

2. Katpin, A. A brief overview of vibration damping devices / A. Katpin, Moises // XX International scientific and practical Conference «Modern engineering and technology». – Tomsk : Tomsk Polytechnic University, 2014.

3. Froozanfar, Mohammad. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art / Mohammad Froozanfar, Saber Moradi, Reza Kianoush, Matthew S. Speicher, Luigi Di Sarno // Journal of Building Engineering. – May 2024. – Vol. 84, 1. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>

4. Yang, Kai. Frame jack-enhanced viscous damping approach for efficient seismic response mitigation of airport control towers / Kai Yang, Zhenhua Xu, Yijia Ma, Minjun Wu, Zhipeng Zhao, Chao Luo // *Structures*. – August 2024. – Vol. 66. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424010117>
5. Burtseva, O.A. Roller Seismic Impact Oscillation Neutralization System for High-rise Buildings / O.A. Burtseva, A.N. Tkachev, S.A. Chipko // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039302?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d74c92eac29e313
6. Zoccolini, L. Fluid Viscous Dampers for seismic protection of bridges: a State of the Art / L. Zoccolini, E. Bruschi, C. Pettorruso, D. Rossi, V. Quaglini // *Procedia Structural Integrity*. – 2024. – Vol. 62. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624006784>
7. Abd-Elhamed, Ayman. Tuned liquid damper for vibration mitigation of seismic-excited structures on soft soil / Ayman Abd- Elhamed, Mohamed Tolan // *Alexandria Engineering Journal*. – December 2022. – Vol. 61, Issue 12. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822002253>
8. Shein, A.I. Modified method of variable elasticity parameters for solving problems of dynamics of rod systems taking into account physical and geometric nonlinearities / A.I. Shein, A.V. Chumanov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 960, 5th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium – WMCAUS 15-19 June 2020, Prague, Czech Republic 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 960 042066. Scopus
9. Shein, A.I. Determination of the parameters of a ribbon-rope damper with a torsion bar or a single-acting hydraulic cylinder / A.I. Shein, A.V. Chumanov, O.G. Zemtsova. – DOI: https://doi.org/10.54734/20722958_2023_2_69 // *Regional Architecture and engineering*. – 2023. – No. 2(55). – P. 69–76. – Certificate of Registration PI FS77-25956 dated October 13, 2006, – ISSN 2072-2958. – URL: <https://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/3136/Nomer%2055.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
10. Shein, A.I. Tape system for damping vibrations of mesh domes with a central mount for seismic impacts / A.I. Shein., A.V. Chumanov // *International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction / BuildInTech BIT 2020. Innovations and Technologies in Construction*. – P.100-107. Scopus
11. Shein, A.I. Belt Vibration Damping System for Closed-Type Domes / A.I. Shein, A.V. Chumanov // *Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE, vol. 160. P. 245-252(2021). Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future, Lecture Notes in Civil Engineering 160*. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_33. Scopus
12. Shein, A.I. A system of cross-linking of production workshops based on ribbon-rope dampers with single-acting hydraulic cylinders under seismic influences / A.I. Shein, V.A. Chumanov. – DOI: https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_143 // *Regional architecture and engineering*. – 2024. – №2 (59). – P. 143–148. – ISSN: 2072-2958.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.16.08

DOI 10.54734/20722958_2025_2_159

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, д. 77,
тел. (8452)99-88-93

Медведева Оксана Николаевна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение
и нефтегазовое дело»
E-mail: medvedeva-on@mail.ru

Сауткина Татьяна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогазоснабжение
и нефтегазовое дело»
E-mail: angelanddiman@mail.ru

*Yuri Gagarin State Technical University of
Saratov*

Russia, 410054, Saratov, 77,
Politekhnicheskaya St.,
tel. (8452)99-88-93

Medvedeva Oksana Nikolaevna,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat and Gas Supply and Oil
and Gas Business»
E-mail: medvedeva-on@mail.ru

Sautkina Tatyana Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Heat and Gas Supply and
Oil and Gas Business»
E-mail: angelanddiman@mail.ru

СРАВНЕНИЕ ОМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

О.Н. Медведева, Т.Н. Сауткина

Представлены результаты анализа экспериментальных установок, используемых для обработки воды, действие которых основано на воздействии магнитного поля на очищаемый поток воды. Проведены исследования работоспособности установок для оценки омагничивания применительно к потоку воды из бытовой водопроводной сети и воды из реки Волга. Установлено, что конструкция омагничивающего устройства должна содержать канал для потока воды, находящийся в однородном магнитном поле, определенной длины. При определении расхода потока, проходящего через установку, необходимо рассмотреть эпюру скоростей в канале и потери напора в нём, в результате чего может быть определена гидравлическая характеристика устройства.

Ключевые слова: магнитное поле, очистка сточных вод, магнитная обработка потока воды, предотвращение накипи, эффективность

COMPARISON OF THE MAGNETIZING ABILITY OF DEVICES FOR MAGNETIC WATER TREATMENT

O.N. Medvedeva, T.N. Sautkina

The paper presents the results of an analysis of experimental installations used for water treatment, the action of which is based on the influence of a magnetic field on the purified water flow. The studies on the installations performance to assess magnetization in relation to the flow of water from the domestic water supply network and water from the Volga River have been conducted. It has been revealed that the design of the magnetizing device must contain a channel for water flow, located in a uniform magnetic field, of a certain length. At the same time, determining the flow rate

passing through the installation, it is necessary to consider the diagram of the velocities in the channel and the pressure loss in it, as a result the hydraulic characteristics of the device can be determined.

Keywords: magnetic field, wastewater treatment, magnetic treatment of water flow, scale prevention, efficiency

Введение. За последние годы метод магнитной водоподготовки нашёл широкое применение в различных производственных технологических процессах, например: для химводоочистки сточных вод, предотвращения трудноудаляемой накипи на стенках паровых котлов и трубопроводов систем теплоснабжения, уменьшения солеотложения при добыче и транспортировке нефти, при деминерализации питьевой воды и т.д. [1–3]. В этой связи для повышения эффективности функционирования и ресурса работы устройств и аппаратов магнитной водоподготовки и очистки актуальными задачами являются усовершенствование существующих и разработка новых конструктивных решений с учетом перспективного развития безреагентных технологий обработки воды [4] как одного из лучших ресурсосберегающих и экологических направлений.

Как показал анализ литературных источников [5–7 и др.], изначально предполагалось использовать омагничивающие установки в промышленных условиях для исключения осаждения накипи внутри элементов котельных агрегатов [1–3, 8–10]. Впервые технология магнитной обработки воды была запатентована Вермейреном и Теофилом в 1946 году [11]. В нашей стране аппараты магнитной обработки в борьбе с накипеобразованием начали успешно применяться в начале 70-х годов прошлого столетия [1, 7, 12]. Исследователями был установлен многофакторный характер воздействия магнитного поля на очищаемые потоки, вызывающего структурные изменения гидратированных ионов и в конечном счете влияющего на физико-химические свойства потока воды.

Теоретический анализ. При проведении экспериментов по исследованию омагничивания применялись химические методы детектирования, не требующие специальных приборов и оборудования.

Способ 1. При омагничивании в воде появляются молекулы перекиси водорода H_2O_2 . Если к воде после ее омагничивания добавить раствор йодистого калия, перекись водорода окисляет йодистый калий и растворимая смесь краснеет.

Способ 2. Известно, что смешивание раствора азотного свинца с раствором йодистого калия приводит к образованию гидроокиси свинца. Из опытов [1] известно, что, если омагничивать раствор смеси свинца с раствором йодистого калия, образуется карбонат свинца из-за повышения концентрации CO_2 в воде в результате омагничивания.

Способ 3. В [2] рекомендуется следующий визуальный способ обнаружения факта омагничивания. Омагниченный раствор азотно-кислого свинца или раствор сернистой меди (сернистого натрия) смешивают с раствором щелочи. Через какой-то промежуток времени в полученном растворе образуются частицы гидроокиси металлов. При магнитной обработке образование последних происходит интенсивнее.

В качестве основных условий омагничивания выделяют [1, 2, 5, 7 и др.]:

1. Вода должна содержать примеси.
2. При прохождении через силовые линии магнитного поля вода должна иметь определенную скорость, заключающуюся в пределах от 0,5 до 2,0 м/с.
3. Напряженность внешнего магнитного поля должна находиться в пределах от 100 до 300 мТ.

Проанализируем данные положения.

1. Как известно, примеси в воде могут быть трех типов: нерастворимые неорганические и органические; растворимые неорганические и органические; примеси в основном органического характера. Согласно общему мнению, для омагничивания необходимо, чтобы в незначительных количествах присутствовали растворенные примеси, например столько, сколько их содержится в воде открытых источников.

2. Хорошо известно, что режим течения может быть как ламинарный, так и турбулентный [14]. Вода, проходя по любым каналам с твердыми стенками, образует эпюру скоростей. Если иметь в виду среднюю скорость, то меньшие значения скорости будут ближе к стенкам, а большие – ближе к центру. При упоминании о скорости воды в магнитном поле большинство авторов не уточняет, с какой скоростью движется очищаемый поток.

Рассмотрим вначале часто применяемые каналы круглого поперечного сечения, считая режим ламинарным, т.е. при значениях $Re_1 < 2300$. Прежде чем проводить сравнение установок для омагничивания воды, сделаем несколько замечаний об условиях омагничивания, при этом отметим, все эти замечания были получены в результате большого числа опытов. Допустим, что омагничивание происходит при скоростях U , заключенных в пределах: $\vartheta_1 \leq U \leq \vartheta_2$, в данном случае U – скорость на линии тока, чтобы не учитывать изменения скорости поперек направления потока. Для общности не будем определять числовые значения ϑ_1 и ϑ_2 , только заметим, что при $\vartheta_1 = 0$ жидкость в постоянном магнитном поле не может быть омагничена. Причина, по которой омагничивание не происходит при $U > \vartheta_2$, неизвестна. Для сохранения ламинарного режима течения необходимо выполнение условия

$$2300 > \frac{\vartheta_2 \cdot d}{\nu}, \quad (1)$$

где d – диаметр трубы.

Во всех источниках литературы, по всей вероятности, за скорость движения жидкости принимается средняя скорость, так как она легко определяется и в инженерных приложениях именно она участвует в расчетах [14].

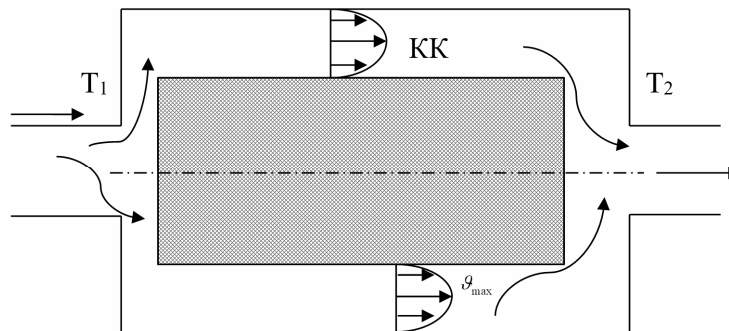
В круглой трубе при ламинарном режиме для средней скорости:

$$\vartheta_{cp} = \frac{\vartheta_{max}}{2}. \quad (2)$$

При значениях скорости ϑ_1 омагничивается часть потока в центральной части, а при значениях скорости ϑ_2 омагничивается поток в виде кольца, поскольку при приближении к стенке трубы скорость уменьшается до нуля. Отсюда делаем вывод, что ламинарный поток в трубе полностью не омагничивается. В качестве оптимального следует рассматривать случай, когда $\vartheta_2 = \vartheta_{max}$, и тогда конструктивно омагничивающее устройство должно быть выполнено в виде трубы круглого сечения и спроектировано с тем расчетом, чтобы выполнялось неравенство

$$\frac{\vartheta_{max} \cdot d}{\nu} < 2000. \quad (3)$$

На рисунке представлен продольный разрез омагничивающего устройства с круглой кольцевой щелью.



Омагничивающее устройство с круглой кольцевой щелью

Вода по трубе T_1 поступает в круглый кольцевой канал КК и затем вытекает из устройства через трубу T_2 , при этом взаимодействие воды с магнитным полем происходит во время протекания ее по кольцевому каналу, толщина которого обычно составляет от 0,5 до 5 мм. При ламинарном движении воды в канале скорость воды в нем распределена по закону [9]:

$$U = \frac{\Delta P}{4\mu\ell} \left(r^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \times \ln r - f(r_1, r_2) \right), \quad (4)$$

где ΔP – падение движения на участке ℓ ; μ – динамическая вязкость; r – текущее значение ($r_2 > r > r_1$); $f(r_1, r_2)$ – функция от r_1 и r_2 имеет вид:

$$f(r_1, r_2) = \frac{r_1^2 \ln r_2 - r_2^2 \ln r_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (5)$$

Очевидно, что в данном случае максимальная скорость в кольцевом зазоре будет иметь место в его середине, что следует из принципа симметрии устройства.

Расстояние от центральной линии до линии максимальной скорости равно:

$$\vartheta_{\max} = \frac{r_1 + r_2}{2}. \quad (6)$$

Подставив полученные значения в формулу (4), запишем зависимость для максимальной скорости в щели (в круговом зазоре):

$$U_{\max} = \frac{\Delta P}{4\mu\ell} \left[\left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \times \ln \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) - f(r_1, r_2) \right]. \quad (7)$$

Аналогично для средней скорости:

$$U_{\text{cp}} = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{\Delta P}{8\mu\ell} \left[r_2^2 + r_1^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right]. \quad (8)$$

Из [9] следует, что число Re для потока в щели равно:

$$\text{Re} = \frac{2U_{\text{cp}}(r_2 - r_1)}{\nu}. \quad (9)$$

Очевидно, что критерий ламинарного режима остается тем же, т.е. $\text{Re} < 2300$, поэтому зависимость для расчета скорости, при которой омагничивание будет оптимальным, имеет следующий вид:

$$\frac{4(r_2 - r_1)}{\nu} \times U_{\text{cp}} \times \frac{2\varphi(r_1, r_2)}{\psi(r_1, r_2)} < 2300. \quad (10)$$

Ввиду сложности точного расчета течения в устройстве с радиальным растеканием жидкости будем использовать среднюю скорость. Границы, в которых растекается поток (то же можно сказать в случае, если он с периферии стремиться к центру),

представляют собой круговые цилиндры диаметром d_2 . В центре цилиндра имеется отверстие диаметром d_1 , чтобы жидкость поступала в центральную часть цилиндров и растекалась от центра к периферии.

Средняя скорость в начале растекания:

$$\vartheta_1 = \frac{Q}{\pi d_1 \cdot \Delta h}. \quad (11)$$

Средняя скорость на периферии:

$$\vartheta_2 = \frac{Q}{\pi d_2 \cdot \Delta h}. \quad (12)$$

Поскольку расчет производим для ламинарного режима, то имеем в виду максимальные скорости, чтобы при их уменьшении в активной зоне устройства поток оставался ламинарным. На сегодняшний день нет единого мнения относительно качественного характера течения, при котором происходит омагничивание. Единственное, что оговаривается большинством исследователей, что в активной зоне не следует устанавливать переходный режим.

Рассмотрим турбулентный режим в активной зоне омагничивания. Допустим, что $\vartheta_1 < U < \vartheta_2$. При этом турбулентный режим гарантирован при выполнении следующих неравенств:

$$\frac{\ell_1 \vartheta_1}{\nu} > 4500; \quad \frac{\ell_2 \vartheta_2}{\nu} > 4500. \quad (13)$$

Или, используя усредненный коэффициент, связывающий средние и максимальные скорости в напорных потоках при турбулентном режиме, получаем:

$$\vartheta_{\text{cp}} = 0,9 \vartheta_{\text{max}}. \quad (14)$$

Очевидно, средняя и максимальная скорости значительно отличаются друг от друга, поэтому дальнейшие расчеты возможно производить по величине ϑ_{cp} .

3. Касательно напряженности магнитного поля, воздействующего на поток воды, принято считать, что поле в пределах потока должно быть однородным, т.е. одинаковой напряженности, что технически сложно. Поэтому многие авторы стремились создать относительно однородное поле в большей части потока. Большинство авторов утверждает, что направление магнитного поля должно составлять 90° с направлением потока. Чаще всего это условие выдерживается, но, к примеру, если вода протекает внутри катушки с током, то в большей части потока направления поля и потока совпадают и ни в одной точке между ними не наблюдается угла в 90° . В этой связи данная задача требует самостоятельного решения. Если рассматривать турбулентный режим течения в активной зоне и считать поток состоящим из отдельных частиц (струек), то, учитывая хаотичные пульсации частиц, затруднительно определить характеристики без их усредненного взаимодействия с магнитным полем.

Рассмотренные условия омагничивания можно дополнить второстепенными [2,7 и др]. Некоторые авторы считают, что вода должна находиться в пределах магнитного поля определенное время, не меньше некоторого минимального значения t_{min} , что налагает дополнительное ограничение на конструкцию установки. Время t_{min} может быть определено после уточнения функции взаимодействия частиц воды и магнитного поля. Допустим, что вода должна находиться в магнитном поле время t , равное:

$$t = \frac{S}{\vartheta}, \quad (15)$$

где S – расстояние, проходимое жидкостью в пределах магнитного поля; ϑ – скорость движения потока воды.

Таким образом, конструкция омагничивающего устройства должна содержать канал для потока воды, находящийся в однородном магнитном поле, длиной $S = t \cdot g$. При этом при определении расхода для установки омагничивания следует учитывать эпюру скоростей в канале, потери напора и гидравлическую характеристику устройства. В некоторых работах утверждается, что в омагничивающем устройстве для обеспечения ожидаемого эффекта вода не менее 4-х раз должна проходить через поля разного направления магнитно-силовых линий. При современном состоянии анализа физики процесса омагничивания этот вопрос остается открытым [14].

Поскольку различное сочетание всех определяющих факторов может привести к совершенно противоположным результатам, оптимальные условия магнитной обработки необходимо подбирать для каждого конкретного случая.

Экспериментальная часть. Особенность методики проведения опытов заключалась в том, что использовалась вода, в том числе из бытовой водопроводной сети, свойства которой, как известно, могут изменяться с течением времени. По этой причине все экспериментальные устройства испытывались последовательно, чтобы время набора воды в каждом из них и набор контрольной пробы не превышали одной минуты. Всего испытывались три устройства, подробная характеристика которых изложена в работе [6]: установка №1 по омагничиванию воды в потоке [13]; установка №2 с течением потока в круговой щели; установка №3 с радиальным течением потока в магнитном поле. Для анализа омагничивания химическими способами для каждого способа брали четыре пробы воды и четыре испытательные контрольные пробы. Для способов 2 и 3 для каждой пробы использовались различные массовые концентрации растворов. Поскольку процесс омагничивания зависит от внешних условий, с учетом положений, изложенных в [2, 8], все испытания повторялись на следующий календарный день. Во всех опытах в активной зоне омагничивания режим движения был турбулентный. Температура воды по результатам замеров: $t_1 = 14,3^\circ\text{C}$; $t_2 = 15,1^\circ\text{C}$. Опыты, выполненные в два приема (в течение двух дней), показали практически одни и те же результаты, мало различающиеся качественно.

Способ 1. Наблюдения велись за изменением цвета смеси при хорошем освещении; если цвет изменялся, то исследуемая проба сравнивалась с контрольной. По результатам исследований в установке №1 изменений цвета не наблюдалось ни при каких условиях, в установке №2 изменения цвета носили слабый и случайный характер, поэтому сделать вывод относительно омагничивания потока не представляется возможным.

Способ 2. Во всех опытах для трех рассмотренных устройств изменений в случае омагничивания и для контрольных проб не наблюдалось.

Способ 3. Частицы гидроокиси свинца образовывались во всех случаях (при большей концентрации интенсивнее и с более крупными частицами), и отличия омагничиванных образцов воды от контрольных проб не были явными.

По результатам исследований были сделаны следующие выводы:

1. Омагничивание было обнаружено только с помощью способа 1 и только на устройстве №3 (с радиальным растеканием).
2. Способы детектирования 2 и 3 не проявили себя как работоспособные и поэтому требуют дальнейших доработок.
3. Установки №1 и №2 требуют конструктивных изменений (возможно, увеличения расхода потока воды при проведении опытов).
4. К практическому применению рекомендуется устройство №3. Как показали результаты экспериментальных исследований, после обработки воды из р. Волги в установке для омагничивания №3 было отмечено снижение: жесткости – на 7 %, содержания Al – на 30 %, содержания железа – на 20 %, содержания хлоридов – на 47 %; мутности – на 15,4 %; КОЕ ОМЧ – на 15,5 %.

1. Классен, В.И. Омагничивание водных систем / В.И. Классен. – Москва : Химия, 1978. – 48 с.
2. Сокольский, Ю.М. Омагниченная вода: правда и вымысел / Ю.М. Сокольский. – 1990. – 153 с.
3. Мосин, О.В. Магнитные системы обработки воды. Основные перспективы и направления / О.В. Мосин // Сантехника. – 2011. – № 1. – С. 28–31.
4. Medvedeva, O.N. Development of Method and Device to Improve the Efficiency of Natural and Wastewater Treatment / O.N. Medvedeva, T.N. Sautkina, E.V. Chesnokova. – DOI 10.1007/978-3-030-91145-4_50 // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 168. – P. 524–534.
5. Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование, моделирование и исследование: монография / С.Н. Антонов, А.И. Адошев, И.К. Шарипов, В.Н. Шемякин. – Ставрополь : СтГАУ, 2014. – 220 с.
6. Medvedeva, O. Comparative Analysis of the Magnetizing Ability of Devices for Magnetic Water Treatment / O. Medvedeva, T. Sautkina. – DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10138961 // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2023. – P. 222–227.
7. Тебенихин, Е.Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках / Е.Ф. Тебенихин. – Москва : Энергия, 1977. – 184 с.
8. Ахмеров, У.Ш. Методы индикации «магнитной» воды / У.Ш. Ахмеров. – Москва : Химия, 1972. – 241 с.
9. Маковозов, М.И. Гидравлика и гидравлические машины / М.И. Маковозов. – Москва : Магнигиз, 1962. – 428 с.
10. Зятин, В.И. Водоподготовка для отопительно-производственных котельных / В.И. Зятин, О.С. Ковальчик // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – №5(133). – С. 18–25.
11. Electric device. United States Patent №2596743 / I. Vermeiren, S. Theophile. – URL: <https://www.freepatentsonline.com/2596743.html>
12. Присяжнюк, В.А. Физико-химические основы предотвращения кристаллизации солей на теплообменных поверхностях / В.А. Присяжнюк // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2003. – №10. – С. 26–30.
13. Калякин, А.М. Экспериментальные установки обработки воды в магнитном поле / А.М. Калякин, Н.И. Король // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2017. – № 1(21). – С. 1–4.
14. Калякин, А.М. Гидравлические расчеты трубопроводов. Истечение жидкости через отверстия и насадки. Гидродинамическое моделирование / А.М. Калякин. – Саратов : СГТУ, 2004. – 56 с.

References

1. Klassen, V.I. Magnetization of water systems / V.I. Klassen. – Moscow : Chemistry, 1978. – 48 p.
2. Sokolsky, Yu.M. Magnetized water: truth and fiction / Yu.M. Sokolsky. – 1990. – 153 p.
3. Mosin, O.V. Magnetic water treatment systems. Main prospects and directions / O.V. Mosin // Plumbing. – 2011. – 1. – P. 28–31.
4. Medvedeva, O.N. Development of Method and Device to Improve the Efficiency of Natural and Wastewater Treatment / O.N. Medvedeva, T.N. Sautkina, E.V. Chesnokova. – DOI 10.1007/978-3-030-91145-4_50 // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 168. – P. 524–534.
5. Magnetic water treatment devices. Design, modeling and research: monograph / S.N. Antonov, A.I. Adoshev, I.K. Sharipov, V.N. Shemyakin. – Stavropol : StGAU, 2014. – 220 p.

6. Medvedeva, O. Comparative Analysis of the Magnetizing Ability of Devices for Magnetic Water Treatment / O. Medvedeva, T. Sautkina. – DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10138961 // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2023. – P. 222–227.
7. Tebenikhin, E.F. Reagent-free methods of water treatment in power plants / E.F. Tebenikhin. – Moscow : Energy, 1977. – 184 p.
8. Akhmerov, U.Sh. Methods for indicating “magnetic” water / U.Sh. Akhmerov. – Moscow : Chemistry, 1972. – 241 p.
9. Makovozov, M.I. Hydraulics and hydraulic machines / M.I. Makovozov. – Moscow : Magnigiz, 1962. – 428 p.
10. Zyatina, V.I. Water treatment for heating and industrial boiler houses / V.I. Zyatina, O.S. Kovalchik [and all] // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. – 2018. – No. 5(133). – P. 18–25.
11. Electric device. United States Patent №2596743 / I. Vermeiren, S. Theophile. – URL: <https://www.freepatentsonline.com/2596743.html>
12. Prisyazhnyuk, V.A. Physico-chemical principles for preventing crystallization of salts on heat exchange surfaces / V.A. Prisyazhnyuk // Plumbing, heating, air conditioning. – 2003. – No. 10. – P. 26–30.
13. Kalyakin, A.M. Experimental installations for water treatment in a magnetic field / A.M. Kalyakin, N.I. Korol // Technical regulation in transport construction. – 2017. – No. 1(21). – P. 1–4.
14. Kalyakin, A.M. Hydraulic calculations of pipelines. Liquid leakage through holes and nozzles. Hydrodynamic modeling / A.M. Kalyakin. – Saratov : SSTU, 2004. – 56 p.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2025_2_167

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

Сафронов Максим Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail: mksafronov@rambler.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40,
тел.: (8412) 66-64-19

Алексеев Дмитрий Петрович,
ведущий инженер кафедры «Транспортные
машины»
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

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

Safronov Maxim Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Water supply, sewerage and
hydraulic engineering»
E-mail: mksafronov@rambler.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 66-64-19

Alekseev Dmitriy Petrovich,
Lead engineer of the department «Transport
Machines»
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СТОЛКНОВЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА В ДИНАМИЧЕСКИХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ «ВОДА – ВОЗДУХ»

С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Д.П. Алексеев, К.В. Лебединский

Представлены результаты теоретических исследований изменений термодинамических и геометрических характеристик пузырьков воздуха в динамических дисперсных системах «вода – воздух», происходящих в процессе их столкновений. Показано, что в процессе многочисленных столкновений воздушных пузырьков они приобретают среднестатистические размеры, соответствующие определенному соотношению величин их поверхностной и объемной энергий. Установлено, что у сферических пузырьков воздуха, всплывающих в ламинарном режиме, и у деформированных пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентном режиме, величины удельной объемной и полной удельной поверхностной энергий имеют постоянные значения, равные $8,9 \text{ Дж/м}^3$ и $0,18 \text{ Дж/м}^2$ соответственно. Отмечено, что снижение величины удельной поверхностной механической энергии (коэффициента поверхностного натяжения) пузырька воздуха в водовоздушной смеси при уменьшении его диаметра компенсируется увеличением поверхностной энергии его электростатического заряда.

Ключевые слова: динамическая дисперсная система, объемная энергия, поверхностная энергия, коалесценция, диспергирование, упругое столкновение, электростатический заряд

THEORETICAL ANALYSIS OF AIR BUBBLES COLLISION PROCESS IN DYNAMIC DISPERSED WATER-AIR SYSTEMS

S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, D.P. Alekseev, K.V. Lebedinskiy

The results of theoretical studies of changes in the thermodynamic and geometric characteristics of air bubbles in dynamic dispersed water-air systems occurring during their collisions are presented. It is shown that in the process of numerous collisions of air bubbles, they acquire average sizes

corresponding to a certain ratio of the magnitude of their surface and volumetric energies. It has been found that for spherical air bubbles floating in laminar mode and deformed air bubbles floating in turbulent mode, the values of specific volume and total specific surface energies have constant values equal to 8.9 J/m^3 and 0.18 J/m^2 , respectively. It is noted that the decrease in the value of the specific surface mechanical energy (surface tension coefficient) of an air bubble in a water-air mixture with a decrease in its diameter is compensated by an increase in the surface energy of its electrostatic charge.

Keywords: dynamic dispersed system, bulk energy, surface energy, coalescence, dispersion, elastic collision, electrostatic charge

В настоящее время широкое распространение в технологиях очистки природных и сточных вод получили водовоздушные смеси, представляющие собой динамические дисперсные системы, в которых сплошной дисперсной средой является вода, а в качестве раздробленной дисперсной фазы выступают пузырьки воздуха, имеющие различные размеры и свободно всплывающие в объеме воды [1, 2]. Размер пузырьков воздуха (диаметр d , м) в водовоздушной смеси и её коэффициент газонаполнения ϕ определяют величину суммарной площади поверхности контакта фаз «вода – воздух», что влияет на интенсивность процессов массопереноса. Исследования авторов [3] показали, что эффективность процесса массопереноса в динамических дисперсных системах «вода – воздух» наряду с параметрами водовоздушной смеси d и ϕ также зависит и от формы воздушных пузырьков, всплывающих в различных режимах в слое водовоздушной смеси высотой $H_{\text{см}}$. В результате проведенных теоретических исследований закономерностей изменения геометрических характеристик пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде в различных гидродинамических режимах, было установлено, что [4]:

- в процессе всплывания пузырька воздуха в ламинарном режиме при величинах критерия Рейнольдса $Re < 500$ и его диаметра $d < 0,0014$ м он имеет строго сферическую форму;
- при всплывании пузырька воздуха в турбулентном режиме ($500 \leq Re \leq 1100$; $0,0014 \leq d < 0,005$ м) пузырек воздуха под действием давления набегающего на него потока воды деформируется, в результате чего он приобретает форму сплюсненного сфероида с большой осью, нормальной к направлению его движения;
- в области развитой турбулентности (область автомодельности закона сопротивления) при величинах $Re \geq 1100$ и $d \geq 0,005$ м всплывающий пузырек сохраняет постоянное значение коэффициента гидравлического сопротивления $\xi = 0,4$, форма пузырька приобретает вид выпукло-вогнутой линзы, при этом нижняя стенка пузырька втягивается внутрь, в результате чего величина его объема W уменьшается.

В работе [4] в качестве характеристик линейных размеров пузырьков воздуха рекомендуется использовать величины: диаметра, d , м, поперечного сечения пузырька максимальной площади ω , м^2 ; характерного размера h , м, – отношения объема пузырька W , м^3 , к площади его поперечного сечения ω , м^2 ; дисперсного размера δ , м, – отношения объема пузырька, W , м^3 , к площади его поверхности f , м^2 .

Также в работе [4] было рекомендовано в качестве параметров, характеризующих геометрические свойства поверхности пузырька воздуха, использовать коэффициент формы k_ϕ , величина которого определяется как отношение площади поверхности пузырька f , м^2 , к максимальной площади его поперечного сечения ω , м^2 , и коэффициент дисперсности k_d , величина которого определяется как отношение диаметра d , м, к дисперсному размеру δ , м. Дисперсный размер пузырька воздуха является величиной, обратной значению его удельной поверхности f_y , $\text{м}^3/\text{м}^2$:

$$f_y = \frac{f}{W} = \frac{1}{\delta}, \text{ м}^3/\text{м}^2, \quad (1)$$

откуда следует, что

$$\delta = \frac{W}{f} = \frac{W}{\omega k_\phi} = \frac{h}{k_\phi}, \text{ м}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{h}{k_{\phi}} = \frac{d}{k_d}, \text{ м}, \quad (3)$$

$$h = \frac{k_{\phi}}{k_d} \cdot d, \text{ м}. \quad (4)$$

Поскольку плотность воды в 800 раз превышает плотность воздуха, на воздушный пузырек объемом W , м³, действует выталкивающая сила Архимеда F_g , Н:

$$F_g = Wg(\rho - \rho_v) = Wg\Delta\rho, \text{ Н}, \quad (5)$$

где $\rho=998,2$ кг/м³, $\rho_v=1,2$ кг/м³ – соответственно плотности чистой воды при температуре 20⁰С и воздуха; $\Delta\rho=997,0$ кг/м³ – разность плотностей воды и воздуха; $g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения.

Действующая на всплывающий в воде пузырек выталкивающая сила F_g , Н, уравнивается силой гидродинамического давления набегающего потока воды F_v , Н, возникновение которой обусловлено вязкостью воды, вследствие чего пузырек воздуха всплывает с постоянной скоростью v , м/с:

$$F_v = F_g = \omega\Delta p_v = \omega\rho\xi\frac{v^2}{2}, \text{ Н}, \quad (6)$$

где Δp_v – разность давлений на лобовой и кормовой поверхностях всплывающего пузырька воздуха, Па; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Ламинарный режим всплывания сферического пузырька воздуха характеризуется стационарностью условий относительно действия силы поверхностного натяжения F_{σ} , Н:

$$F_{\sigma} > F_g = F_v, \text{ Н}, \quad (7)$$

$$F_{\sigma} = \pi d\sigma\frac{d}{2R}, \text{ Н}, \quad (8)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха, Н/м; $R = \frac{d}{2}$ – радиус кривизны поверхности сферического пузырька воздуха, м.

В турбулентных режимах всплывания деформированного пузырька воздуха имеет место динамическое равновесие действующих на всплывающий пузырек сил:

$$F_{\sigma} = F_g = F_v, \text{ Н}. \quad (9)$$

Внутри всплывающего пузырька воздуха под действием силы поверхностного натяжения F_{σ} возникает избыточное давление воздуха Δp , Па:

$$\Delta p = \frac{F_{\sigma}}{\omega} = \frac{\pi d\sigma\frac{d}{2R}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{2\sigma}{R}, \text{ Па}. \quad (10)$$

Было установлено [5], что в процессе всплывания пузырька в ламинарном режиме ($Re < 500$) и турбулентном режиме ($500 \leq Re \leq 1100$) величина избыточного давления воздуха внутри пузырька сохраняет свое постоянное значение $\Delta p = 8,9$ Па = const.

В соответствии с формулами (5) и (6) скорость всплывания пузырька воздуха v зависит от объема пузырька W и величины коэффициента гидравлического сопротивления ξ .

Вследствие разности скоростей всплывания пузырьков воздуха, имеющих различные объемы, происходят их многочисленные столкновения друг с другом, которые приводят к следующим результатам:

1) Дробление пузырьков, при котором суммарный объем сталкивающихся (исходных) пузырьков равен суммарному объему образующихся более мелких (диспергированных) пузырьков, а суммарная площадь поверхности вновь образующихся пузырьков превышает суммарную площадь поверхности сталкивающихся пузырьков.

2) Слияние (коалесценция) пузырьков, в результате чего суммарный объем сталкивающихся пузырьков равен суммарному объему вновь образующихся пузырьков, а суммарная площадь поверхности вновь образующихся пузырьков имеет меньшую площадь, чем суммарная площадь поверхности сталкивающихся пузырьков.

3) Столкновение пузырьков воздуха по упругому механизму, в результате которого остаются неизменными как суммарный объем пузырьков, так и величина их суммарной площади поверхности.

Пузырек воздуха сферической формы имеет величины коэффициентов формы $k_\phi=4$; дисперсности $k_d=6$ и кривизну поверхности $R = \frac{1}{2}d$.

Сферический пузырек воздуха диаметром d (радиусом $r = \frac{1}{2}d$) обладает некоторыми величинами объемной энергии E_w , Дж, и поверхностной энергии E_f , Дж:

$$E_w = \Delta p \cdot W = \Delta p \cdot \frac{\pi d^3}{6} = \Delta p \cdot \frac{4}{3} \pi r^3, \text{ Дж}, \quad (11)$$

$$E_f = \sigma \cdot f = \sigma \cdot \pi d^2 = \sigma \cdot 4 \pi r^2, \text{ Дж}. \quad (12)$$

Величина разности поверхностной E_f и объемной E_w энергий для сферического пузырька воздуха имеет значение

$$\Delta E = E_f - E_w = \sigma \pi d^2 - \Delta p \frac{\pi d^3}{6} = \sigma \cdot 4 \pi r^2 - \Delta p \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 = f(r), \text{ Дж}. \quad (13)$$

Продифференцировав уравнение (13) и приняв $\sigma=\text{const}$ и $\Delta p=\text{const}$, можно получить экстремальное значение функции $\Delta E=f(r)$ при условии $f'(r)=0$:

$$f'(r) = \sigma \cdot 8 \pi r - \Delta p \cdot 4 \pi r^2 = 0, \quad (14)$$

откуда

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}, \text{ Па}. \quad (15)$$

С учетом того что для сферического пузырька $R = r = \frac{d}{2}$, из формулы (15) может быть выведено уравнение Лапласа:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} = \frac{4\sigma}{d}, \text{ Па}. \quad (16)$$

Поскольку в формуле (16) используется величина радиуса кривизны поверхности, с ее помощью можно определять величину избыточного давления воздуха в деформированном пузырьке с несферической формой, всплывающем в турбулентном режиме.

Из формулы (15) следует, что

$$r = \frac{2\sigma}{\Delta p}, \text{ м}, \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{\Delta p \cdot r}{2}, \text{ Н/м.} \quad (18)$$

Подставив формулы (15), (17) и (18) в формулу (13), получим:

$$\Delta E = \sigma \cdot 4\pi \cdot \frac{4\sigma^2}{\Delta p^2} - \Delta p \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{8\sigma^3}{\Delta p^3} = 4\pi \cdot \frac{\sigma^3}{\Delta p^2} \left(4 - \frac{8}{3} \right) = \frac{16}{3} \cdot \frac{\pi\sigma^3}{\Delta p^2}, \text{ Дж,} \quad (19)$$

$$\Delta E = \frac{\Delta p r}{2} \cdot 4\pi r^2 - \Delta p \cdot \frac{4\pi r^3}{3} = 4\pi r^3 \Delta p \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \right) = \frac{4}{6} \pi r^3 \Delta p = \frac{1}{2} E_w, \text{ Дж,} \quad (20)$$

$$\Delta E = \sigma \cdot 4\pi r^2 - \frac{2\sigma}{r} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 = 4\pi r^2 \sigma \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \right) = \frac{4}{3} r^2 \sigma = \frac{1}{3} E_f, \text{ Дж.} \quad (21)$$

Из формул (20) и (21) следует, что экстремальное значение разности поверхностной и объемной энергий для пузырька сферической формы равно $\frac{1}{2}$ от величины его объемной энергии E_w и $\frac{1}{3}$ от величины его поверхностной энергии E_f :

$$\Delta E = \frac{1}{2} E_w = \frac{1}{3} E_f = \frac{16}{3} \cdot \frac{\sigma^3}{\Delta p^2}, \text{ Дж.} \quad (22)$$

Отношение величины объемной энергии к значению поверхностной энергии является энергетическим коэффициентом пузырька воздуха k_3 .

Для пузырька воздуха сферической формы, всплывающего в ламинарном режиме, энергетический коэффициент сохраняет постоянную величину:

$$k_{эс} = \frac{E_{wc}}{E_{fc}} = \frac{\Delta p \pi d^3}{6} \cdot \frac{1}{\sigma \pi d^2} = \frac{4\sigma}{d} \cdot \frac{\pi d^3}{6} \cdot \frac{1}{\sigma \pi d^2} = \frac{4}{6} = \frac{k_{фс}}{k_{дс}} = \text{const.} \quad (23)$$

Было установлено [5], что в критической точке перехода турбулентного режима всплывания деформированного пузырька воздуха в область автомодельности закона сопротивления, в которой $\xi=0,4=\text{const}$, величина энергетического коэффициента уменьшается до значения

$$k_{э*} = \frac{E_{w*}}{E_{f*}} = \frac{k_{ф*}}{k_{д*}} = \frac{1}{k_{дс}} = \frac{2,66}{16} = \frac{1}{6}. \quad (24)$$

Избыточное давление воздуха в пузырьках, всплывающих в ламинарном и турбулентном режимах, имеет оптимальное значение $\Delta p=8,9$ Па, позволяющее обеспечить их столкновение по упругому механизму, в результате которого суммарная площадь поверхности пузырьков в процессе столкновения не изменяется. При столкновении пузырьков, имеющих избыточное давление воздуха более $\Delta p=8,9$ Па, произойдет их дробление, в результате чего суммарная площадь поверхности вновь образующихся пузырьков увеличится, что приведет при неизменной величине поверхностной энергии к уменьшению величины коэффициента поверхностного натяжения σ и в соответствии с формулой (19) понижению компенсирующего его внутреннего давления Δp . При столкновении пузырьков, имеющих избыточное давление воздуха менее $\Delta p=8,9$ Па, произойдет их слияние (коалесценция), в результате чего суммарная площадь поверхности вновь образовавшегося пузырька уменьшится, что приведет при неизменной величине поверхностной энергии к увеличению значения коэффициента поверхностного натяжения σ и в соответствии с формулой (19) повышению значения компенсирующего его внутреннего давления Δp .

В процессе многочисленных столкновений всплывающих пузырьков друг с другом они приобретают определенные среднестатистические размеры, соответствующие оптимальному соотношению величины их объемной и поверхностной энергии.

Пузырьки воздуха, всплывающие в ламинарном и турбулентном режимах, имеют постоянную величину удельной объемной механической энергии:

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_w}{W} = \Delta p = 8,9 = \text{const}, \text{ Дж/м}^3; \text{ Па.} \quad (25)$$

При этом удельная поверхностная механическая энергия пузырьков не является постоянной величиной:

$$E_{f\text{уд}} = \frac{E_f}{f} = \sigma \neq \text{const}, \text{ Дж/м}^2; \text{ Н/м.} \quad (26)$$

Величина полной удельной поверхностной энергии пузырьков воздуха $E_{\text{пол.у}}$ включает в себя сумму удельной механической энергии σ , Дж/м², удельное значение скрытой теплоты образования поверхности раздела фаз «вода – воздух» G_T , Дж/м², удельную поверхностную энергию электростатического заряда поверхности пузырька воздуха G_ϕ , Дж/м²; удельную химическую энергию веществ, адсорбированных на поверхности пузырька G_μ , Дж/м² [6, 7].

Для пузырьков воздуха в чистой воде величина удельной химической энергии веществ, адсорбированных на их поверхности, равна нулю ($\sigma_\mu=0$), а величина полной удельной поверхностной энергии пузырьков воздуха имеет постоянное значение:

$$E_{\text{пол.у}} = \sigma + G_T + G_\phi = \sigma + T \cdot S_T + c_f \frac{\phi^2}{2} = 0,118 = \text{const}, \text{ Дж/м}^2, \quad (27)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха (удельная механическая поверхностная энергия), Дж/м²; T – абсолютная температура, К; S_T – температурный коэффициент ($S_T=0,000154 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$); c_f – удельная электрическая емкость единицы поверхности пузырька воздуха $\Phi/\text{м}^2$; ϕ – электрический потенциал двойного электрического слоя поверхности пузырька, В.

Снижение величины коэффициента поверхностного натяжения (удельной поверхностной механической энергии) пузырька воздуха при уменьшении его диаметра компенсируется увеличением удельной поверхностной энергии электростатического заряда поверхности пузырька.

В ы в о д ы :

1. В процессе многочисленных столкновений всплывающих (в водовоздушной смеси) пузырьков воздуха они приобретают определенные среднестатистические размеры, соответствующие оптимальному соотношению их поверхностной E_f , Дж, и объемной E_w , Дж, энергий.

2. Оптимальное соотношение величин поверхностной E_f , Дж, и объемной E_w , Дж, энергий (энергетический коэффициент k_3) пузырька воздуха, всплывающего в ламинарном режиме, сохраняет постоянное значение, равное значению соотношения величин коэффициента формы $k_{\text{фс}}$ и коэффициента дисперсности $k_{\text{дс}}$ сферического пузырька $\left(k_3 = \frac{E_w}{E_f} = \frac{k_{\text{фс}}}{k_{\text{дс}}} = \frac{4}{6} = \text{const} \right)$.

3. Пузырьки воздуха, всплывающие в ламинарном и турбулентных режимах, имеют постоянную величину удельной объемной механической энергии $E_{\text{уд}} = \frac{E_w}{W} = \Delta p = 8,9 = \text{const}, \text{ Дж/м}^3; \text{ Па.}$

4. Пузырьки воздуха, всплывающие в водовоздушной смеси, имеют постоянную величину полной удельной энергии $E_{\text{пол.у}} = 0,118 = \text{const}, \text{ Дж/м}^2$, при этом снижение величины удельной поверхностной механической энергии пузырька воздуха при

уменьшении его диаметра компенсируется увеличением удельной поверхностной энергии электростатического заряда поверхности пузырька.

Список литературы

1. Levitsky, I. Micro and nanobubbles in water and wastewater treatment : A state-of-the-art review / I. Levitsky, D. Tavor, V.Gitis // *Journal of Water Process Engineering*. – 2022. – Vol. 47. – P. 102688.
2. Fan, W. A modelling approach to explore the optimum bubble size for micro-nanobubble aeration / W. Fan, Y. Li, T. Lyu, J. Yu, Z. Chen, P. Jarvis, Y. Huo, D. Xiao, M. Huo // *Water Research*. – 2023. – Vol. 228, Part A. – P. 119360.
3. Gumulya, M. Dynamics of bubbles rising in pseudo-2D bubble column: Effect of confinement and inertia / M. Gumulya, R.P. Utikar, V.K. Pareek, G.M. Evans, J.B. Joshi // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 405. – P. 126615.
4. Андреев, С.Ю. Теоретический анализ термодинамических характеристик пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде в различных режимах / С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – №2(59). – С. 164–174.
5. Андреев, С.Ю. Зависимость свойств водовоздушных смесей от степени дисперсности пузырьков воздуха / С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Д.П. Алексеев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2025. – №1(62).
6. McNamee, C.E. Forces between a hard surface and an air–aqueous interface with and without films / C. E. McNamee, S. Yamamoto // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. – 2020. – Vol. 47. – P. 1–15.
7. Петрунин, А.А. Совершенствование технологии флотационной очистки нефтесодержащих производственных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего устройства : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петрунин Алексей Алексеевич, 2016. – 161 с.

References

1. Levitsky, I. Micro and nanobubbles in water and wastewater treatment : A state-of-the-art review / I. Levitsky, D. Tavor, V.Gitis // *Journal of Water Process Engineering*. – 2022. – Vol. 47. – P. 102688.
2. Fan, W. A modelling approach to explore the optimum bubble size for micro-nanobubble aeration / W. Fan, Y. Li, T. Lyu, J. Yu, Z. Chen, P. Jarvis, Y. Huo, D. Xiao, M. Huo // *Water Research*. – 2023. – Vol. 228, Part A. – P. 119360.
3. Gumulya, M. Dynamics of bubbles rising in pseudo-2D bubble column: Effect of confinement and inertia / M. Gumulya, R.P. Utikar, V.K. Pareek, G.M. Evans, J.B. Joshi // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 405. – P. 126615.
4. Andreev, S.Yu. Theoretical analysis of thermodynamic characteristics of air bubbles floating in clean water in various modes / S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinsky // *Regional architecture and construction*. – 2024. – №2(59). – P. 164–174.
5. Andreev, S.Yu. The dependence of the properties of water-air mixtures on the degree of dispersion of air bubbles / S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, D.P. Alekseev // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – №1(62).
6. McNamee, C.E. Forces between a hard surface and an air–aqueous interface with and without films / C. E. McNamee, S. Yamamoto // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. – 2020. – Vol. 47. – P. 1–15.
7. Petrunin, A.A. Improving the technology of flotation purification of oily industrial wastewater using a rotary dispersing device : specialty 05.23.04 «Water supply, sewerage, construction systems for water resources protection» : dissertation for the degree of Candidate of Sciences / Petrunin Alexey Alekseevich, 2016. – 161 p.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 725

DOI 10.54734/20722958_2025_2_174

*Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры*

Россия, Донецкая Народная Республика,
286123, г.о. Макеевский, г. Макеевка,
ул. Державина, д. 2

Радио́нов Тиму́р Вале́рьевич,
кандидат архитектуры, доцент,
зав. кафедрой «Архитектурное
проектирование и дизайн архитектурной
среды»

E-mail: timur.radionov@mail.ru

Харьковская Наталья Николаевна,
ассистент кафедры «Архитектурное
проектирование и дизайн архитектурной
среды»

E-mail: n.n.povetkina@donnasa.ru

Бенаи Хафизулла Аминуллович,
доктор архитектуры, профессор,
декан архитектурного факультета

E-mail: kh.a.benai@donnasa.ru

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технология и организация
строительного производства», советник
РААСН, лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники

E-mail: l.sabitov@bk.ru

Российский университет дружбы народов
Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6

Фазылзянова Гузилия Ильгизовна,
доктор культурологии, профессор,
профессор каф. «Архитектура,
реставрация и дизайн»

*Donbass National Academy of Civil
Engineering and Architecture*

Russia, Donetsk People's Republic,
286123, city district. Makeevsky,
Makeevka, 2, Derzhavina St.

Radionov Timur Valerievich,
Candidate of Architecture, Associate
Professor, Head of the Department of
«Architectural Design and Architectural
Environment Design»

E-mail: timur.radionov@mail.ru

Natalya Nikolaevna Kharkovskaya,
Assistant of the Department of «Architectural
Design and Architectural Environment
Design»

E-mail: n.n.povetkina@donnasa.ru

Benai Hafizullah Aminullovich,
Doctor of Architecture, Professor,
Dean of the faculty of architecture

E-mail: kh.a.benai@donnasa.ru

*National Research Moscow State University
of Civil Engineering*

Russia, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26

Sabitov Linar Salikhzanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department of «Technology and Organization
of Construction Production», advisor to
RAASN, laureate of the Russian Government
Prize in the field of science and technology

E-mail: l.sabitov@bk.ru

Peoples' Friendship University of Russia
Russia, Moscow, 6, Miklukho-Maklaya St.

Fazylzyanova Guzilia Ilgizovna,
Doctor of Cultural Studies, Professor,
Professor of the Department of Architecture,
Restoration and Design

НОВЕЙШАЯ АРХИТЕКТУРА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Т.В. Радио́нов, Л.С.Сабитов, Н.Н. Харьковская, Х.А. Бенаи, Г.И. Фазылзянова

Исследованием определены основные архитектурно-градостроительные и технологические подходы, отвечающие вызовам нового времени в области формирования, развития и совершенствования новейшей архитектуры. Обобщена мировая практика в

отношении способов реконструкции объектов научно-исследовательской сферы деятельности, которые систематизированы на предмет использования вариативных возможностей наиболее значимых архитектурно-градостроительных и конструктивно-технологических компонентов. Предложена теоретико-методологическая стратегия разработки проектных решений научно-исследовательских комплексов, подлежащих реконструкции на основе принципов технологического лидерства. Определены архитектурно-технологические компоненты, позволяющие разрабатывать новейшие проектные решения по реконструкции объектов рассматриваемого типа с учетом использования передовых технологий и систем, а также строительных конструкций и материалов.

Ключевые слова: новейшая архитектура, научно-исследовательский комплекс, поисковые проектные модели, экспериментальное проектирование, реконструкция, технологическая организация

THE LATEST ARCHITECTURE OF RESEARCH COMPLEXES

T.V. Radionov, L.S. Sabitov, N.N. Kharkovskaya, Kh.A. Benai, G.I. Fazylzyanova

The study identifies the main architectural, urban planning and technological campaigns that meet the challenges of modern times in the field of formation, development and improvement of modern architecture. The world practice is summarized in relation to the methods of reconstruction of objects in the research field of activity, which are systematized for the use of variable possibilities of the most significant architectural and urban planning and structural and technological components. A strategy for updating the architecture of research complexes to be reconstructed based on the principles of technological leadership is proposed. Architectural and technological components have been identified that allow the development of the latest design solutions for the reconstruction of objects of the type taking into account the use of advanced technologies and systems and building structures and materials.

Keywords: latest architecture, scientific research complex, exploratory design models, experimental design, reconstruction, technological organization

Проблемное поле исследования. Формирование архитектуры научно-исследовательских комплексов способствует развитию не только науки, но и государства в целом. Объекты, предназначенные для научной деятельности, являются сегодня одними из важнейших типов рабочих пространств. Они должны обеспечивать оптимальные условия для разработки и внедрения различных инноваций, основанных на результатах научных исследований и приводящих к значительным изменениям в общественной практике. Научно-исследовательские комплексы и отдельные схожие по функциям объекты архитектуры на сегодняшний день нуждаются в комплексной реконструкции вследствие морального и физического износа, который обусловлен длительным и непрерывным периодом эксплуатации без проведения плановых ремонтно-восстановительных работ, а также реконструктивных мероприятий.

Необходимость исследования проблем формирования новейшей архитектуры научно-исследовательских комплексов, участвующих в реконструктивных мероприятиях, определена насущной востребованностью выработки стратегии реконструкции объектов рассматриваемого типа, которая включает способы расширения, перепланировки, рефункционализации, переустройства, модернизации зданий и сооружений научно-исследовательской отрасли [1].

Современная архитектура с учетом исторической эволюции научно-исследовательских комплексов подразумевает применение новейших архитектурных решений и технологий при проектировании и строительстве зданий, предназначенных для проведения научных исследований. Это позволяет создавать комфортные и безопасные условия для организации работы сотрудников и лиц, пребывающих в анализируемых объектах [2,3].

Научная формула исследования основывается на комплексной организации процесса реконструкции объектов рассматриваемого типа, на учете современных мировых тенденций и потребностей, а также на использовании передовых технологий строительства и энергоэффективных решений, что является основой для создания

комфортных и современных пространств для научных исследований и внедрения инновационных технологий на уровне архитектурно-технологической организации объектов научно-исследовательской сферы деятельности.

Основной материал. Научно-исследовательская работа сегодня охватывает все области науки и техники. Разнообразие её структуры и универсальность позволяют создавать новые и практичные модели, предназначенные для решения задач, связанных с обеспечением благоприятных и удобных условий для общества. Архитектурные подходы, применяемые при проектировании зданий и сооружений научно-исследовательских комплексов, способствуют изучению разных научных предположений и обеспечивают разнообразие проектно-технологических решений с учетом их инновационных компонентов [4, 5].

Архитектурно-градостроительные решения в сфере проектирования зданий и сооружений научно-исследовательской отрасли указывают на то, что на сегодняшний день размещение научно-исследовательских комплексов в сложившейся городской среде положительно отражается на формировании выразительной архитектуры и устойчивых городских территорий с развитой инфраструктурой, благоустроенными прилегающими открытыми пространствами, которые в равной степени со зданиями участвуют в процессе реконструкции.

Необходимо отметить, что под термином «технологическое лидерство» следует понимать комплекс архитектурно-технологических мероприятий, при которых разработанное итоговое проектное решение основывается в первую очередь на применении новейших технологий и систем, разработанных учеными и практиками в Российской Федерации. К ним можно отнести: конструктивные элементы со сложными формообразующими составляющими, самовосстанавливающиеся строительные материалы, интеллектуальные системы управления зданиями, «зеленое строительство» с учетом использования возобновляемых источников энергии и энергоэффективных технологий.

Процесс проектирования и дальнейшая реконструкция, а также эксплуатация научно-исследовательских комплексов могут быть важными составляющими общественной и социальной жизни населения. Архитектурно-эксплуатационная пригодность рассматриваемых объектов определяется с использованием следующих архитектурно-технологических подходов, которые отвечают за комплексный процесс функционирования научно-исследовательских комплексов и основываются на:

- определении градостроительных приоритетов при реконструкции зданий и сооружений научно-исследовательских комплексов в структуре городской застройки [6];
- комплексном развитии и совершенствовании инфраструктуры, обеспечивающей удобное использование таких объектов и формирующей благоприятные условия для отраслевой научной принадлежности;
- совершенствовании архитектурных компонентов, применяемых в процессе реконструкции существующих зданий и сооружений объектов научной сферы деятельности, на основе которых могут быть созданы научно-исследовательские комплексы и кластеры, а впоследствии и целые наукограды [7–9];
- развитии и совершенствовании архитектурной типологии зданий и сооружений научно-исследовательской отрасли с целью формирования объектов нового поколения [10];
- интеграции новейших технологических решений объектов рассматриваемого типа, которые позволяют формировать новые образно-стилистические и выразительные с точки зрения восприятия проектные решения, которые основываются на использовании уникальных технологических разработок на уровне конструкций здания (главные формообразующие элементы).

В ходе исследования процессов современного проектирования научно-исследовательских комплексов были определены основные архитектурно-градостроительные требования, предъявляемые к размещению подобных объектов и включающие следующие компоненты:

- организацию беспрепятственного доступа для пешеходов, интеграцию объекта в существующий ландшафт;

- гармоничное сочетание с существующей застройкой;
- развитую инфраструктуру и развитую транспортную сеть.

Важно отметить, что вышеизложенные компоненты по территориальному размещению объектов научно-исследовательской отрасли обусловлены особенностями архитектуры, связанными с общей тенденцией размещать здания и сооружения так, чтобы обеспечить наилучшие условия для последующей модернизации существующего объекта на этапе его преобразования и реконструкции.

Архитектурно-технологическая и планировочная организация зданий и сооружений научно-исследовательских комплексов учитывает в своей содержательной части определение последовательности возведения объектов городской застройки, а также их частей в зависимости от степени сложности технологического устройства объекта архитектуры, его объёмно-планировочных и конструктивных решений [11].

В процессе исследования определены ключевые компоненты архитектурно-технологической организации научно-исследовательских комплексов нового поколения, которые участвуют в процессе реконструкции и включают в свою структуру следующее:

- *энергоэффективность и ресурсосбережение*, определяющие степень автономности объекта, предусматривающие использование передовых технологий и систем для обеспечения энергетической независимости, альтернативных источников энергии;
- *экологичность*, которая подразумевает применение экологически чистых строительных материалов, рациональное использование и охрану энергоресурсов, а также использование элементов «зелёной архитектуры»;
- *долговечность*, характеризующуюся высокой технологичностью инженерного оборудования, конструктивно-технической надёжностью и защитой конструктивных элементов от воздействия разрушающих факторов внешней среды и атмосферных осадков;
- *уникальность*, выражающуюся в сложной форме покрытия фасадов здания, в объёмных фасадных панелях и конструкциях, а также в использовании местных строительных материалов и технологий.

На основании вышеизложенных научных убеждений соавторами статьи предложена теоретико-методологическая стратегия разработки проектных решений научно-исследовательских комплексов нового поколения (рис. 1), включающая:

- *структурный анализ*: рассматривает объекты как системы с общими свойствами, что позволяет оценивать взаимодействие компонентов и учитывать требования к объекту в контексте окружающей среды;
- *содержание и форму объекта*: определяет современные требования к объектам с учетом социальных, культурных и эстетических потребностей общества, а также взаимосвязь между внутренней структурой и внешней формой;
- *взаимодействие внешнего и внутреннего*: подчёркивает важность комплексного подхода к проектированию, учитывающего связь объекта с окружающей средой и его место в общей пространственной системе;
- *функциональную целесообразность*: акцентирует внимание на внутренних связях и функциональных процессах объектов проектирования.

Практико-ориентированным подтверждением формирования научно-исследовательского комплекса нового поколения, реализуемого в условиях реконструкции с учетом внедрения новейших технологических компонентов как на уровне формообразующих конструкций, так и при использовании строительных материалов, является экспериментальный проект «Реконструкция научно-исследовательского института под научно-исследовательский комплекс нового поколения в городе Донецке». Необходимо отметить, что на градостроительном уровне процесс реконструкции должен сопровождаться комплексной оценкой опорного плана участка застройки и его функциональными возможностями для развития и совершенствования прилегающей территории.

Одним из важнейших компонентов при формировании новейшей архитектуры (в данном случае на примере научно-исследовательского объекта, который подлежит

реконструкции) является использование сложных формообразующих конструкций и новейших строительных, а также отделочных материалов, которые задают «форму» объекта, его стилистику и архитектурно-художественную выразительность (рис. 3, 4).

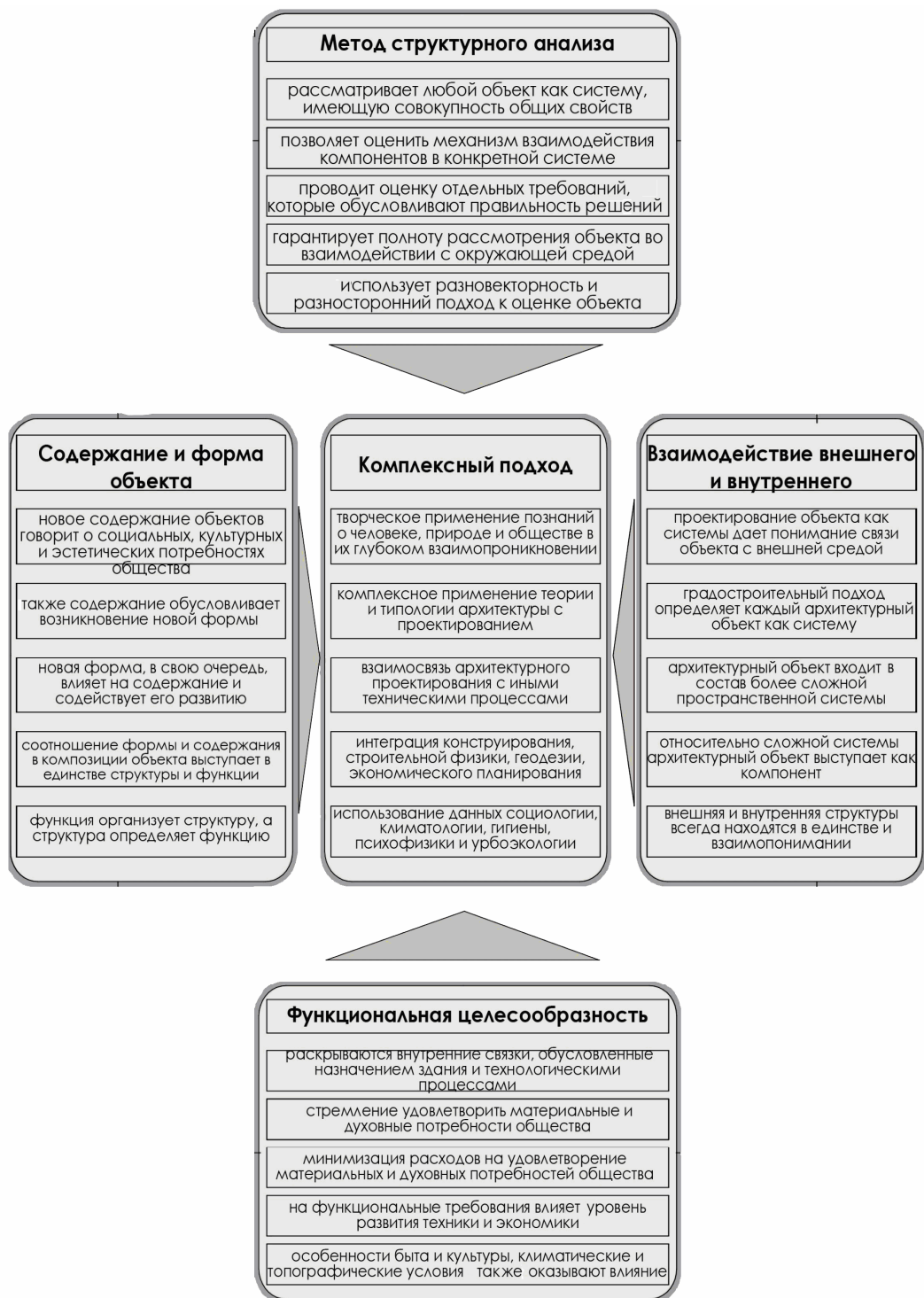


Рис. 1. Теоретико-методологическая стратегия разработки проектных решений научно-исследовательских комплексов нового поколения

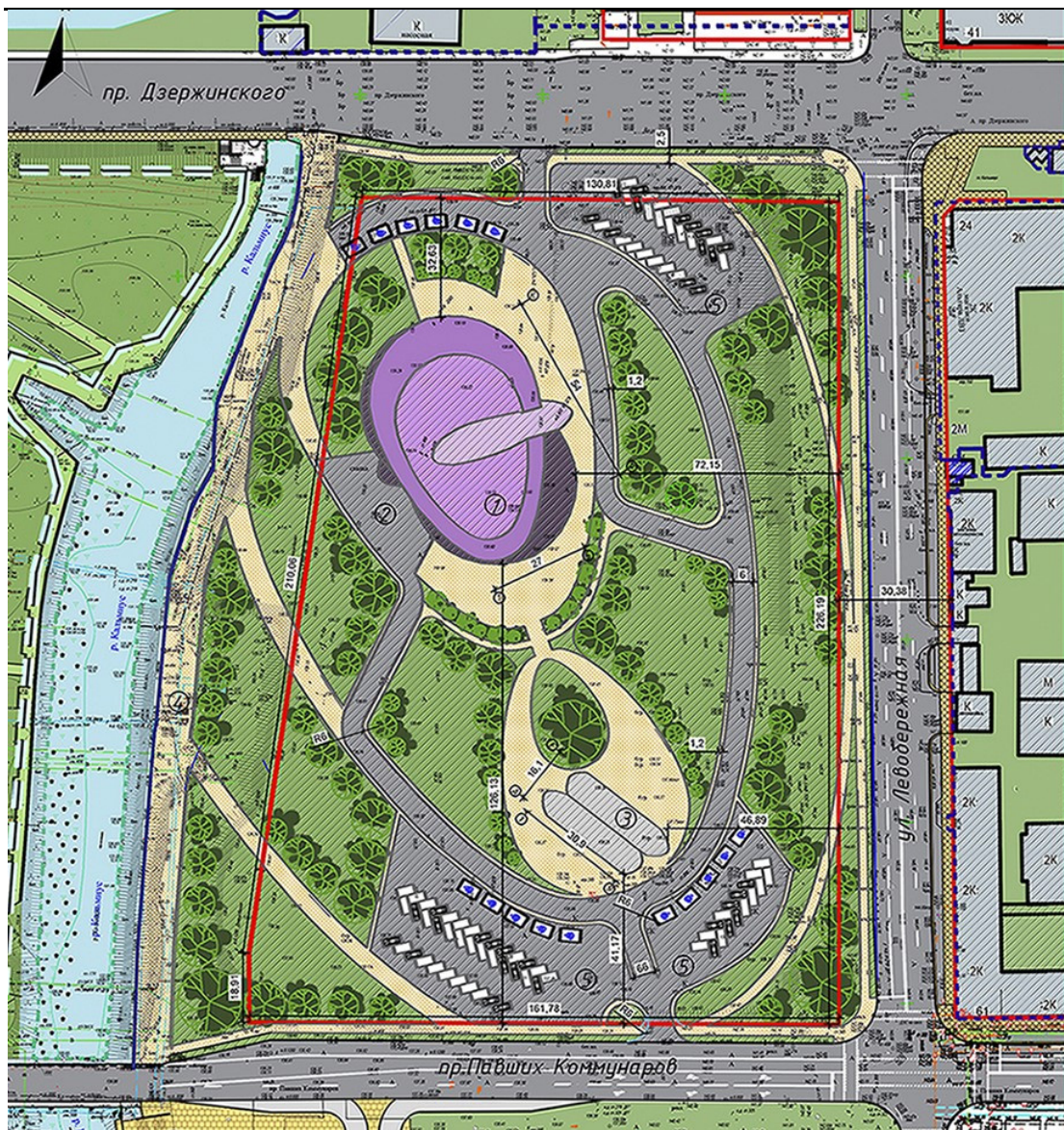


Рис. 2. Схема генерального плана научно-исследовательского комплекса после реконструкции



Рис. 3. Объемно-пространственная организация научно-исследовательского комплекса после реконструкции (главный корпус)

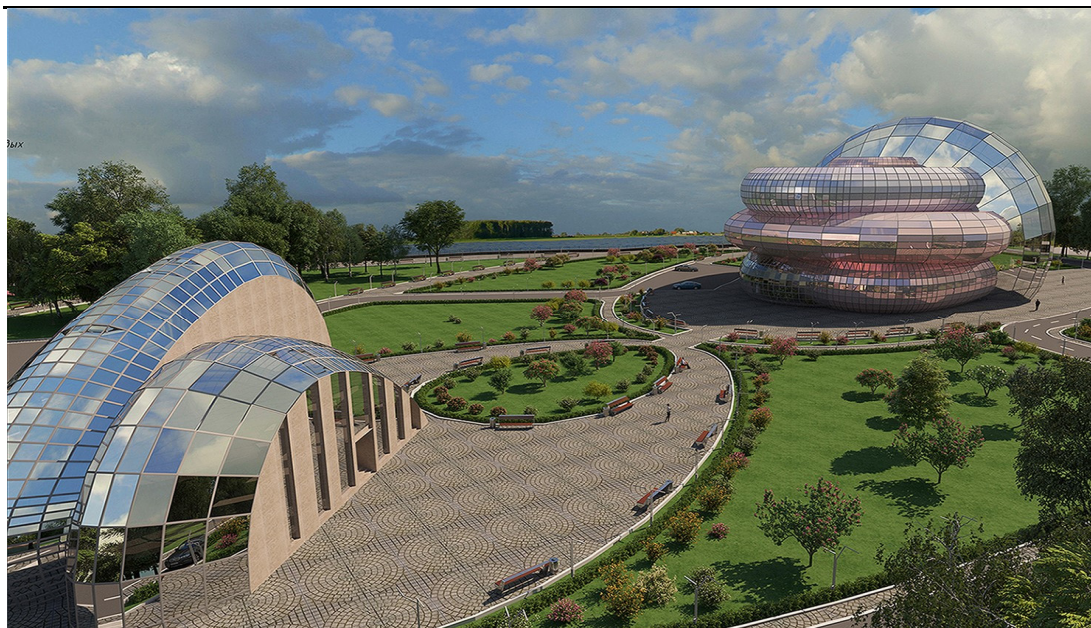


Рис.4. Объемно-пространственное решение научно-исследовательского комплекса после реконструкции (общий вид территории с элементами благоустройства)

Разработанное экспериментальное решение по реконструкции научно-исследовательского института под научно-исследовательский комплекс нового поколения в городе Донецке носит прикладной характер исследования. В первую очередь необходимо отметить, что генеральный план (см. рис. 2) разработан с учетом того, что объекты подобного назначения нуждаются в комплексной организации всей прилегающей территории, которая может претендовать на статус инновационного градостроительного комплекса [12]. Это обусловлено необходимостью формирования на градостроительном уровне всех функциональных зон для проведения исследований (лаборатории открытого типа, демонстрационные площадки для воспроизведения и демонстрации полученных результатов), в том числе интерактивных научных площадок для привлечения в современную науку лиц из разных возрастных групп.

Объемно-пространственная организация научно-исследовательского комплекса, представленная на рис. 3 и 4, основывается на системе геометрических ограничений, в рамках которой заложен принцип создания «бесконечного множества» вариативных решений. С одной стороны, это простая система восприятия сложных формообразующих элементов, с другой – гибкая динамическая структура, которая из разных видовых точек будет напоминать о единой стилистике и композиционно-художественной выразительности, но при этом восприниматься будет «неодинаково».

Выводы. Исследования показали, что новейшая архитектура научно-исследовательских комплексов должна обладать наивысшим потенциалом для формирования качественных образно-стилистических, композиционно-художественных, функционально-типологических решений, направленных на создание единой системы восприятия, выразительности, в отдельных случаях – уникальности и типологической узнаваемости. При этом существенное значение имеют архитектурно-технологические возможности совершенствования и развития функционально-типологической структуры объектов, поскольку современные научные центры представляют собой не только здания и сооружения (отдельно стоящие), но и динамичную среду, которая основывается на симбиозе архитектуры, конструкций, технологий. На основе такой формулы можно формировать новейшие объекты архитектуры научно-исследовательской отрасли, реализуемые в условиях обоснованной реконструкции.

Установлено, что современная архитектура зданий научно-исследовательских комплексов может не только динамично развивать свою архитектурно-типологическую структуру, но и максимально взаимодействовать с окружающей средой. В связи с этим проявляется целый ряд предпосылок и факторов, оказывающих влияние

на формирование архитектурной организации существующих научно-исследовательских институтов, что приобретает решающее значение на данном этапе совершенствования объектов рассматриваемого типа, которые подлежат реконструкции.

Доказано, что реконструкция научно-исследовательских комплексов – это сложный и многоуровневый процесс, который может быть реализован с использованием обоснованных методик, способов и подходов. Исследованные компоненты, участвующие в формировании новейшей архитектуры научно-исследовательских комплексов при реконструкции, играют важную роль в успешной трансформации архитектуры подобных объектов с использованием современных технологий.

Список литературы

1. Бенаи, Х.А. Архитектура научно-образовательных комплексов в условиях реконструкции / Х.А. Бенаи, Т.В. Радионов, Л.С. Сабитов, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №3 (60). – С. 166–174.
2. Балакина, А.Е. Адаптивная планировочная структура научно-исследовательских центров / А.Е. Балакина, Р.К. Газарян // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4(37). – С. 113–121.
3. Конникова, А.Н. Архитектурно-градостроительная организация научно-исследовательских учреждений в условиях комплексной реконструкции / А.Н. Конникова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2021. – № 2(148). – С. 138–145.
4. Логинов, И.Ю. Проблемы архитектурно-планировочной организации зданий и комплексов зданий научно-исследовательских институтов / И.Ю. Логинов, О.Л. Банцеева // Архитектура и современные информационные технологии. – 2014. – № 3(28). – С. 13.
5. Брейбрук, С. Проектирование научно-исследовательских центров / С. Брейбрук, Х. Гудман, Б. Гоулд ; под ред. С. Брейбрук ; пер. с англ. В.А. Коссаковского ; под ред. П.А. Овчинникова. – Москва : Стройиздат, 1990. – 198 с.
6. Захарова, А.В. История эволюции архитектуры научно-исследовательских объектов / А.В. Захарова // Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика. – 2023. – № 1(1). – С. 96–102.
7. Трифонкина, Д.С. Научно-исследовательские объекты как инновационные градостроительные комплексы в истории архитектуры / Д.С. Трифонкина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, №1. – С. 274–277.
8. Пучков, М.В. Принципы проектирования научно-образовательных центров нового поколения: архитектура современных технологий обучения / М.В. Пучков // Академия. – 2011. – № 2. – С. 48–51.
9. Гретченко, А.И. Формирование научно-исследовательских университетских кластеров в рамках Евразийского экономического союза / А.И. Гретченко, А.А. Гретченко // Проблемы современной экономики. – 2016. – № 4(60). – С. 216–219.
10. Мирхасанов, Р.Ф. Колокольня Богоявленской церкви в Казани: законы и средства композиции / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин, Х.А. Бенаи, Т.В. Радионов // Строитель Донбасса. – 2023. – № 4 (25). – С. 17–21.
11. Мирхасанов, Р.Ф. Инженерно-строительная эстетика в постройках Пэна С.С. / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 211–216.
12. Дианова-Клокова, И.В. Об архитектурных решениях научных и инновационных объектов / И.В. Дианова-Клокова, Д.А. Метаньев // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 1. – С. 64–73.

1. Benai, H.A. Architecture of scientific and educational complexes in the context of reconstruction / H.A. Benai, T.V. Radionov, L.S. Sabitov, O.L. Viktorova // *Regional architecture and Engineering*. – 2024. – No. 3 (60). – P. 166–174.
2. Balakina, A.E. Adaptive planning structure of research centers / A.E. Balakina, R.K. Gazaryan // *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2012. – No. 4 (37). – P. 113–121.
3. Konnikova, A.N. Architectural and urban planning organization of research institutions in the context of comprehensive reconstruction / A.N. Konnikova // *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*. – 2021. – No. 2 (148). – P. 138–145.
4. Loginov, I.Yu. Problems of architectural planning organization of buildings and building complexes of research institutes / I.Yu. Loginov, O.L. Bancerova // *Architecture and modern information technologies*. – 2014. – No. 3 (28). – P. 13.
5. Braybrook, S. Design of research centers / S. Braybrook, H. Goodman, B. Gould ; Ed. S. Braybrook ; Transl. from English. V.A. Kossakovsky ; Ed. P.A. Ovchinnikov. – Moscow : Stroyizdat, 1990. – 198 p.
6. Zakharova, A.V. History of the evolution of the architecture of research facilities / A.V. Zakharova // *Architecture. Restoration. Design. Urbanism*. – 2023. – No. 1 (1). – P. 96–102.
7. Trifonkina, D.S. Research facilities as innovative urban development complexes in the history of architecture / D.S. Trifonkina // *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2015. – Vol. 17, No. 1. – P. 274–277.
8. Puchkov, M.V. Design principles of new generation scientific and educational centers: architecture of modern educational technologies / M.V. Puchkov // *Academy*. – 2011. – No. 2. – P. 48–51.
9. Gretchenko, A.I. Formation of research university clusters within the Eurasian Economic Union / A.I. Gretchenko, A.A. Gretchenko // *Problems of modern economy*. – 2016. – No. 4 (60). – P. 216–219.
10. Mirkhasanov, R.F. Bell tower of the Epiphany Church in Kazan: laws and means of composition / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin, H.A. Benai, T.V. Radionov // *Stroitel Donbassa*. – 2023. – No. 4 (25). – P. 17–21.
11. Mirkhasanov, R.F. Engineering and construction aesthetics in the buildings of Pen S.S. / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – No. 3 (56). – P. 211–216.
12. Dianova-Klokova, I.V. On architectural solutions for scientific and innovative objects / I.V. Dianova-Klokova, D.A. Metanyev // *Academia. Architecture and construction*. – 2021. – No. 1. – P. 64–73.

УДК 725.826:796

DOI 10.54734/20722958_2025_2_183

Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 603950, г. Н. Новгород,
ул. Ильинская, д. 65,
тел.: (831) 430-54-92;

МГУ им. Н.П. Огарёва

Россия, 430000, г. Саранск, ул. Советская, д. 24,
тел.: 8(951) 055-86-80

Разумов Андрей Валерьевич,
аспирант ННГАСУ по направлению
подготовки 2.1.12 Архитектура,
ст. преподаватель кафедры «Архитектура
и дизайн»
E-mail: razumov.arch@gmail.com

Nizhny Novgorod State University of
Architecture and Civil Engineering University
Russia, 603950, N. Novgorod, 65,
Ilyinskaya St.,
tel: (831) 430-54-92

N.P. Ogaryov Mordovian State University

Russia, 430000, Saransk, 24, Sovetskaya St,
tel: 8(951) 055-86-80

Razumov Andrey Valerievich,
Postgraduate student of the Department of
Architectural Environment Design, senior
lecturer of the Department «Architecture and
Design»
E-mail: razumov.arch@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНОЙ РЕОРГАНИЗАЦИИ СТАДИОНОВ «ЛУЖНИКИ» (МОСКВА) И «МАРАКАНА» (РИО-ДЕ-ЖАНЕЙРО)

А.В. Разумов

Исследованы особенности архитектурной реорганизации двух главных футбольных арен Москвы и Рио-де-Жанейро, крупнейших спортивных сооружений России и Бразилии – стадионов «Лужники» и «Маракана». Проведен анализ, как эти объекты сформировались в градостроительном, композиционном, объемно-планировочном и конструктивном аспектах и какое влияние они оказывают на комплексную организацию городской среды. Сформулированы выводы о влиянии архитектурной реорганизации на развитие объектов, их адаптации к внутренним и внешним изменениям конструктивных элементов, функциональной программы и градостроительного контекста.

Ключевые слова: футбольный стадион, спортивная арена, архитектурная реорганизация, концептуальный образ, городская среда

THE SPECIFICS OF ARCHITECTURAL REORGANIZATION OF STADIUMS «LUZHNIKI» (MOSCOW) AND «MARACANA» (RIO DE JANEIRO)

A.V. Razumov

The article defines the features of the architectural reorganization of two main football arenas of Moscow and Rio de Janeiro, the largest sports facilities in Russia and Brazil – the Luzhniki and Maracana stadiums. An analysis of how these objects have been formed in urban planning, compositional, space-planning and structural aspects and what influence they have on the complex organization of the urban environment is made. Conclusions about the influence of architectural reorganization on the development of the objects, their adaptation to internal and external changes in structural elements, functional program and urban context are formulated.

Keywords: soccer stadium, sports arena, architectural reorganization, conceptual image, urban environment

Сохранение архитектурного наследия является одним из важных факторов в архитектуре, в том числе при возведении крупнейших спортивных сооружений, способных кардинально преобразить визуально и активировать функционально обширную территорию вокруг себя, формируя новую программу развития района, города или целого региона. В XXI веке на передний план выходит вопрос формирования

экоустойчивого стадиона, обеспечивающего охрану окружающей среды. Перспективным приемом организации архитектурной среды может стать развитие функциональных взаимосвязей внутреннего и внешнего пространств футбольной арены. Реорганизация сооружения – один из способов сохранения исторического наследия с возможностью обновить объект согласно современным требованиям эксплуатации, реализовать программу реставрации фасадов и архитектурных деталей, а также добавить новые элементы, соответствующие будущей или текущей функциональности стадиона.

Актуальный пример успешной реорганизации – стадион «Лужники» (арх. А.В. Власов, И.А. Рожин, Н.Н. Уллас, А.Ф. Хряков), Москва, Россия, 1956 г. Проектирование и строительство стадиона велось в период с 1955-го по 1956 год. Первоначальное название арены – Центральный стадион им. В.И. Ленина. Сооружение реконструировали три раза, впервые его обновили к Олимпиаде-1980. Самым важным визуальным изменением стала установка четырех мощных осветительных мачт по внешнему кольцу арены, электронного табло над трибунами и архитектурной композиции с чашей для Олимпийского огня, а функциональным – расширение дорожек для бега. Следующая реорганизация проводилась в 1996–1997 гг. Ключевыми функциональными изменениями стали замена деревянных лавок на трибунах для зрителей на индивидуальные кресла и возведение над трибунами сложных большепролетных конструкций из металла с полупрозрачным покрытием кровли. Такие масштабные изменения сократили число зрителей с 103 тыс. до 78 тыс. К Чемпионату мира по футболу – 2018 была проведена третья реорганизация. Полностью трансформировались спортивное ядро и трибуны, убрали беговые дорожки, сохранился только исторический фасад стадиона. Основопологающей целью реорганизации являлось выполнение новых требований FIFA по площадям и вместимости. Вместе с ней была достигнута цель сохранить исторический облик арены.

Стадион «Лужники» расположен на берегу реки Москвы в спорткомплексе «Лужники». В состав комплекса помимо большой спортивной арены входят: малая спортивная арена, Дворец спорта «Лужники», универсальный спортивный зал «Дружба». Стадион находится на оси планирования, созданной генеральным планом Москвы 1930-х годов, связывающей ключевые объекты города, такие, как Кремль, храм Христа Спасителя и Московский государственный университет. Футбольное поле отклонено от оси север-юг на 45 градусов, что подчеркивает важность композиционного размещения стадиона по направлению от Кремля к университету.

Стадион «Маракана» (арх. Рафаэль Гальвао, Педру Бастос, Орландо Азеведо, Антониу Карнейру, Мигель Фельдман, Валдир Рамос и Оскар Валдетару) возведен в 1950 г. и расположен в центральной части Рио-де-Жанейро в Бразилии. В состав комплекса помимо футбольной арены входит крытый спортивный зал «Мараканзиньо». Стадион, вмещавший 200 тысяч зрителей, долгое время являлся крупнейшим стадионом в мире [1]. Только в XXI в. он трижды закрывался на реорганизацию. Первая масштабная реорганизация в 2000-м привела к уменьшению зрительских мест до 103 тысяч. Для этого устроили «жерал» (специальные площадки за воротами для стоячих мест) и установили индивидуальные пластиковые кресла, заменив все деревянные скамьи. В 2005 году стадион «Маракана» повторно подвергся реконструкции для подготовки к приему Панамериканских игр – 2007. Ранее поле было отделено от трибун технологическим рвом с водой, главной функцией которого являлся отвод воды с трибун во время тропических ливней по проложенным дренажным каналам. Подобный элемент есть ещё на ряде южноамериканских стадионов [2]. Вместимость снова снизилась и составила 82 тыс. зрителей. В 2010 году стадион «Маракана» третий раз за 10 лет закрылся на самую масштабную реконструкцию в своей истории. Объект уже находился под защитой закона об охране памятников исторического наследия, что накладывало запрет на внешние изменения стадиона. Реконструкцию проводила бразильская студия архитектора Даниэля Фернандеша. Трибуны обновились, нижние ярусы были снесены и перестроены на новой опорной конструкции из металла, стали ближе к полю, расстояние сократилось с 30 до 13 метров, а само поле было немного

поднято вверх и приближено к трибунам. Изношенная бетонная крыша была демонтирована, новую большепролетную несущую конструкцию спроектировали по принципу колеса со спицевым центром – с внешним опорным кольцом, внутренним натяжным кольцом и несущими тросами. Получившаяся крыша абсолютно плоская и не видна с уровня улицы снаружи стадиона, так как ее монтаж осуществлен на опоры с внутренней стороны фасадов. Дождевая вода, попадающая на мембрану, покрывающую несущую систему, собирается в специальные резервуары, а затем используется для внутренних нужд стадиона. За счет супертонких конструкций и мембранного светопрозрачного покрытия крыша филигранно вписалась в эстетический образ обновленного стадиона «Маракана».

Стадион ориентирован по оси реки Маракана, вытекающей из долины горы Корковаду. Направление устья долины задает композиционный вектор для стадиона. Его отклонение от оси север-юг обусловлено сложившимися географическими факторами и показывает важность композиции как первостепенного аспекта расположения масштабного объема арены.

Средовой фактор расположения стадионов преобладает над климатическим. Объекты находятся в разных климатических поясах, но это не вызывает заметного влияния на их архитектуру – оба стадиона проектировались и возводились в 1950-х гг. и представляли собой открытые чаши трибун, овальные в плане. Средовой фактор, напротив, определяет значимость данных арен в градостроительной ситуации мегаполисов, где они расположены. Сходство прослеживается в том, что в обоих случаях стадионы были спроектированы на границах исторической застройки, на участках, тяготеющих к центральной части города, причем в обоих случаях выбрана большая зеленая зона у реки с расчетом на последующее расширение.

По отношению к городскому каркасу и коммуникациям стадион «Лужники» находится на пересечении третьего транспортного кольца, русла Москвы-реки и пешеходных связей по набережной. Территорию спорткомплекса «Лужники» пересекает линия Комсомольского проспекта, идущего от Садового кольца параллельно существующей композиционной оси стадиона. В целом территория представляет собой большую зону полукруглой формы, ограниченную 3-м транспортным кольцом и дугой Москвы-реки. Стадион «Лужники» имеет доминантное территориальное значение по отношению как к градостроительному каркасу, который структурно окружает спортивный кластер, так и к ткани города, которая представляет собой плотную селитебную зону из жилой и общественной застройки.

Центр Рио-де-Жанейро формируется вокруг горы Корковаду, огибая ее склоны с восточной стороны, обращенной к Атлантическому океану. Относительно вершины горы стадион «Маракана» находится по левую руку от статуи Христа-Искупителя, венчающей остроконечную вершину. Со смотровой площадки на пике чаша стадиона образно лежит на склоне хребта, спускающегося в долину Praça da Bandeira – района Рио-де-Жанейро. В этой части города размещена жилая и общественная селитебная зона. Участок под стадион являлся зеленой зоной, которую впоследствии застроили другими спортивными и общественными сооружениями. С севера к арене примыкает активная железнодорожная магистраль, связывающая все районы города.

Оба стадиона являются спортивными объектами с приоритетной функцией футбольной арены. По конструктивному аспекту здания схожи – их конструкцию образуют трибуны по периметру спортивного ядра [3]. Этажность стадионов обусловлена количеством ярусов посадочных мест, причем на момент постройки оба стадиона обладали одним ярусом, поднимающимся от овала плоскости поля к внешней границе опорных стеновых конструкций. При последующих реорганизациях полностью изменили внутреннее устройство трибун, их наклон и рядность, сохранив при этом внешнее решение фасадов каждой из арен.

Композиция обоих стадионов, обладающих центрической структурой, художественно осмыслена в единстве всех элементов. Стадион «Лужники» имеет правильную форму, похожую на эллипс, образованный двумя полукруглыми фасадами, обращенными на северо-запад и юго-восток и соединенными прямыми вставками трибун в

центральной части, перпендикулярно направлению главной оси. Композиция спокойная и уравновешенная. Ее завершает кружевной эллипсоидный купол с осями 350х270 метров, вырастающий из карниза исторического фасада стадиона.

Стадион «Маракана» имеет форму овала, композиционно состоит из трех ярусов, поднимающихся на опорных стойках, изящно расширяющих объем арены вверх. Ключевое отличие стадиона «Маракана» от «Лужников» заключается в конструкции большепролетной кровли – она не увеличивает объем здания, сохраняя первоначальную высоту и масштаб. Конструкция кровли плоская и целиком скрыта за историческим фасадом стадиона, а арена стадиона «Лужники» почти вдвое увеличилась в высоту за счет применения купольной конструкции кровли во время реконструкции 1996-1997 гг. «Маракана» кажется больше «Лужников», но это ощущение обеспечивается близостью застройки, подступившей вплотную к стадиону, и общим футуризмом фасадных решений, в то время как стадион «Лужники» размещен в центре обширной зеленой зоны, которая размывает масштаб сооружения. Стадион обладает привычными фасадными решениями с ритмическими рядами окон, визуально уменьшающими размер стадиона. «Маракана» имеет габариты 317х279 м (при высоте 32 м), а «Лужники» – 312х252 м (при высоте 54 м).

Морфотип стадиона «Маракана» образно-ассоциативный. Это футуристический диск летающей тарелки, плоский, динамичный, готовый получить максимальное ускорение и вращение за долю секунды. Два опорных моста, пронзающих диск во внешнем диаметре, символично сдерживают энергетику тарелки. Они образно закрепляют ее на земле, становясь пешеходными шлюзами для погружения во внутреннее пространство арены. Мосты дополнительно усилены дугообразными колоннадами, раскрывающимися на площади перед входами на стадион с противоположных сторон. Стадион выходит далеко за рамки простой материальной формы и важен тем, что он отражает социальные структуры спортивной истории страны и материальные практики, которые он формирует своей функциональной программой на протяжении семидесяти лет.

Морфотип стадиона «Лужники» – метафоричность, выраженная в архитектуре арены. «Лужники» – это Колизей советского спорта, воплощающий философию спортивного действия. В основе формообразования арены лежит авторское видение архитектора А.В. Власова, который своим проектом символично завершил целую главу советской спортивной архитектуры обращением к античному римскому прототипу – Колизею. Арена стремится приобрести универсальный характер сценической площадки для спортивного действия. Стадион «Лужники» становится самостоятельным объектом, стягивающим и организующим пространство вокруг, подчиняющим его себе. План сооружения приобретает форму правильного эллипса. Фасады оформлены в виде сплошной колоннады из тонких опор-столбов, вырастающих из цокольного этажа и несущих массивный карниз, завершающий объем стадиона. Горизонтальность объема подчеркнута рядами окон с выделенными линиями этажей. Вертикальные членения колонн вместе с горизонтальными членениями этажей создали узнаваемую геометрическую сетку стадиона, некоторую монотонность которой разбавляют оконные проемы разной высоты, а также двухуровневые входные арки, разрывающие первый ярус. Метафора античной арены полностью раскрылась в классическом исполнении конструктива стадиона «Лужники». Устройство большепролетной крыши лишь усилило эту метафору, добавив во внешний облик сооружения за счет купольной конструкции образ античного пантеона спорта, облаченного в современные строительные технологии [5].

Колористическое решение каждой из арен монохромное, разница лишь в материальном исполнении, текстуре и фактуре используемых материалов. В «Маракане» преобладает бетон со свойственной ему светло-серой цветовой гаммой. Фасады стадиона «Лужники» облицованы натуральным камнем песочно-бежевого цвета, остальные элементы, включая колоннаду и карнизы, выполнены в идентичном цветовом решении.



Рис. 1. Стадион «Маракана», Рио-де-Жанейро, Бразилия;
стадион «Лужники», Москва, Россия



Рис. 2. Стадион «Маракана» до и после реконструкции 2010 г.

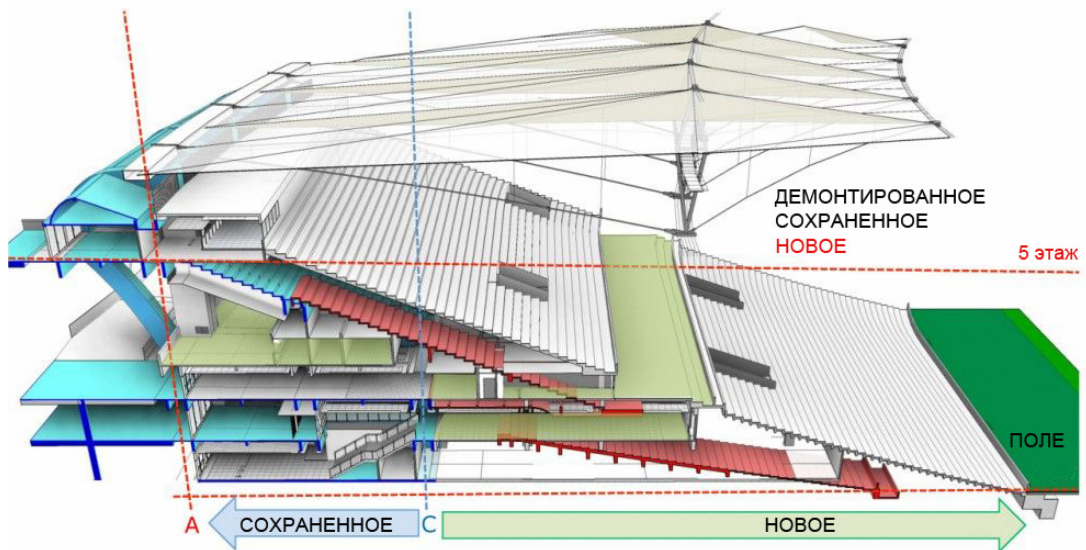


Рис. 3. Конструкции трибун и кровли после реорганизации.
Стадион «Маракана», Рио-де-Жанейро, Бразилия

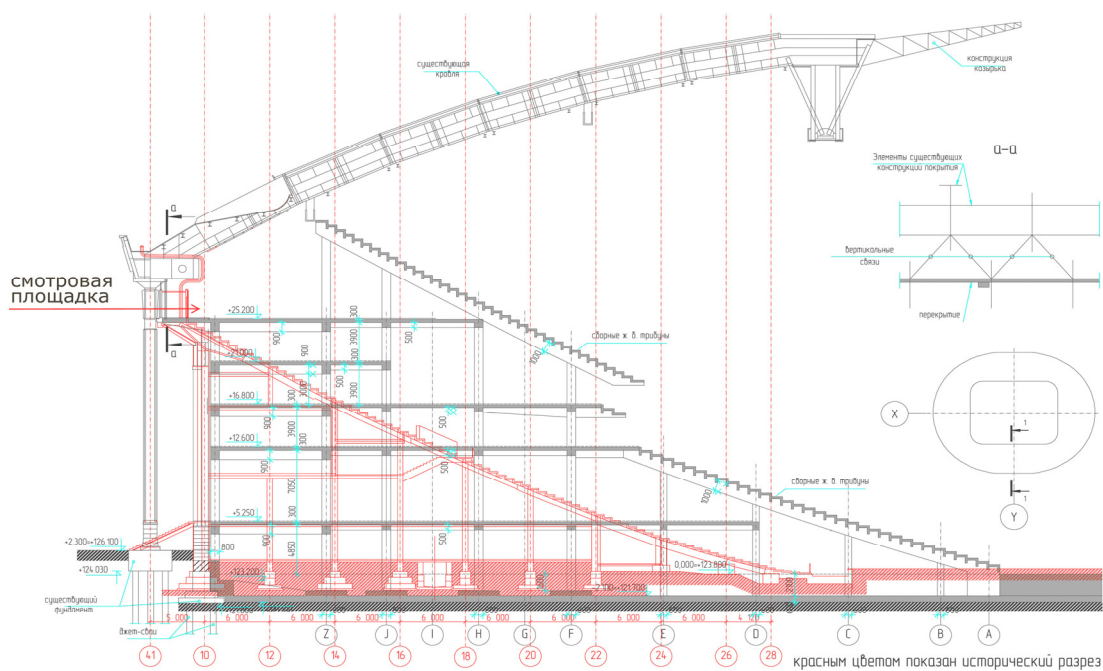


Рис. 4. Конструкции трибун и кровли после реорганизации.
Стадион «Лужники», Москва, Россия

Каждая из арен решена комплексно и удовлетворяет сложившимся градостроительным решениям, функционально-планировочным требованиям, обладает отличительными композиционными и художественно-образными характеристиками. Конструктивные особенности качественным образом отвечают за формирование объема сооружений, определяют внешний облик арен, участвуют в концептуальном формообразовании. Стадионы в своем окончательном архитектурном выражении несут мощный социальный контекст – они являются местом единения десятков тысяч человек в сценическом пространстве спортивной арены, обретающей культовый статус и символизирующей общий дух соревновательности и любви к спорту.

Городской контекст вокруг арен расположен в непосредственной близости от сложившихся зон смешанного использования (развлекательные, коммерческие, рекреационные, жилые и т. д.), что приводит к объединяющему эффекту и расширению радиуса охвата стадионов. Уровень связности у существующих стадионов «Лужники» и «Маракана» с центральными частями городов Москва и Рио-де-Жанейро и размещенными в них общественными зонами более органичен по сравнению со вновь построенными объектами (за исключением случаев, когда новый объект является частью проекта по редевелопменту города, что подтверждает практическую значимость своевременной реорганизации арен, имеющих историческое и культурное значение).

Проведенный сравнительный анализ реорганизации стадионов позволяет сделать следующие выводы:

1) Два стадиона («Лужники», «Маракана») представляют собой сооружения, измененные (по сравнению с первоначальным архитектурным замыслом) в ходе трех этапов реконструкции, в результате которых были добавлены новые или реорганизованы существующие части арен с сохранением большей доли оригинальных элементов.

2) Обзор особенностей реорганизации стадионов «Лужники» и «Маракана» показал, что основным архитектурным признаком современного стадиона является спортивное ядро – футбольное поле, вокруг которого формируется конструктивная и функциональная оболочка стадиона с возможностью реорганизации в универсальное пространство.

3) Универсальность пространства стадиона позволяет реорганизовать целые или составные части арены с целью адаптации их к современным требованиям при проведении соревнований, а также к новым сценариям использования в качестве многофункциональных сооружений.

4) Архитектура крупнейших спортивных арен демонстрирует широкий диапазон реорганизационных возможностей. Это дает основание полагать, что внедрение приемов реорганизации и своевременные изменения позволяют поддерживать стадионы, формирующие вокруг себя комплексную городскую среду, в актуальной парадигме многофункциональности.

5) Стадионы, наряду с другими общественными сооружениями, являются объектами социальной инфраструктуры. В градостроительном аспекте они оказывают сильное влияние на характер и своеобразие районов, в которых расположены. Включение спортивных сооружений в городскую среду делает их более доступными для населения и позволяет максимизировать сферу влияния этих объектов с точки зрения активности и разнообразия городского ландшафта, а также ценности, которую они придают соседним районам и городу в целом.

Список литературы

1. Виммер, М. Проектирование стадионов : практическое пособие : пер. с англ. / М. Виммер. – Берлин : Dom Publishers, 2016. – 320 с.
2. Gaffney, C. Mega-events and socio-spatial dynamics in Rio de janeiro, 1919-2016 / C. Gaffney // Brazilian Journal of Leisure Studies. – 2016.
3. Сулова, О.Ю. Объёмно-планировочные решения современных многофункциональных спортивных комплексов в условиях XXI века / О.Ю. Сулова, П.А. Смольянов // Современные технологии. – 2019. – №2. – С. 88–95.
4. Акопян, Э.С. Архитектура стадионов / Э.С. Акопян // Государственный музей архитектуры имени А.В. Щусева; Кучково поле Музеон. – 2018. – 312 с.
5. Виммер, М. Олимпийские стадионы: от ипподрома к трансформеру / М. Виммер // Speech. – 2015. – № 15 «Спорт». – С. 40–55.

References

1. Wimmer, M. Sports stadiums : A practical manual : trans. from English / M. Wimmer. – Berlin : Dom Publishers, 2016. – 320 с.
2. Gaffney, C. Mega-events and socio-spatial dynamics in Rio de janeiro, 1919-2016 / C. Gaffney // Brazilian Journal of Leisure Studies. – 2016.
3. Suslova, O.Yu. Volume-planning solutions of modern multifunctional sports complexes in the conditions of the XXI century / O.Yu. Suslova, P.A. Smolyanov // Modern Technologies. – 2019. – №2. – P. 88–95.
4. Akopyan, E.S. Architecture of stadiums / E.S. Akopyan // A.V. Shchusev State Museum of Architecture; Kuchkovo Pole Museon. – 2018. – 312 с.
5. Wimmer, M. Olympic stadiums: from hippodrome to transformer / M. Wimmer // Speech. – 2015. – No. 15 “Sport”. – P. 40–55.

УДК 725

DOI 10.54734/20722958_2025_2_193

*Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы*

Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Гарькин Игорь Николаевич,

кандидат технических наук, кандидат
исторических наук, зав. кафедрой
«Архитектура, реставрация и дизайн»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

Галишникова Вера Владимировна,

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Архитектура,
реставрация и дизайн»

E-mail: galishni@yandex.ru

*Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba*

Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya St., 6

Garkin Igor Nikolaevich,

Candidate of Sciences, Candidate
of Historical Sciences, Head of the
Department «Architecture, Restoration and
Design»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

Galishnikova Vera Vladimirovna,

Doctor of Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Architecture,
Restoration and Design

E-mail: galishni@yandex.ru

МЕТОДИКА ДЕТЕРМИНАЦИИ СТЕПЕНИ ДЕСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: СИСТЕМНО-СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

И.Н. Гарькин, В.В. Галишникова

С позиций оценки историко-архитектурной значимости архитектурных объектов культурного наследия предложены метод детерминации степени разрушения (деструкции) и системно-структурный анализ возможности их восстановления. Особое внимание уделено четырем степеням деструкции объектов с точки зрения возможного их восстановления.

Ключевые слова: объекты культурного наследия, архитектура, историко-архитектурная ценность, деструкция, системно-структурный анализ, детерминация

METHOD OF DETERMINING THE DEGREE OF DESTRUCTION OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS: SYSTEM-STRUCTURAL ANALYSIS

I.N. Garkin, V.V. Galishnikova

From the standpoint of assessing the historical and architectural significance of architectural objects of cultural heritage, a method for determining the degree of destruction and analyzing the possibility of their restoration using system-structural analysis is proposed. Particular attention is paid to four degrees of destruction of objects from the point of view of their possible restoration.

Keywords: cultural heritage objects, architecture, historical and architectural value, destruction, system-structural analysis, determination

Одним из качественных показателей существующего состояния архитектурных объектов культурного наследия является их целостность, определяемая отсутствием деструктивных изменений. Целостность характеризуется состоянием архитектурных объектов культурного наследия, при котором все элементы архитектурного объекта обладают такими характеристиками (форма – содержание – место – значение) и связями, которые позволяют обеспечить его гармоничное существование и развитие. Воздействие на какой-либо элемент объекта, его изменение, утрата или появление нового вызывают изменения в других элементах и в историческом объекте в целом. Поэтому задача состоит в том, чтобы выявить дисгармонизирующие элементы и связи, вызвавшие планировочное, объемно-пространственное и функциональное разрушение объекта [1].

Для определения целостности предлагается метод определения степени разрушения (нарушения целостности) архитектурных объектов культурного наследия, предполагающий выявление дисгармонизирующих элементов и нарушений в установленных связях между отдельными элементами в системе архитектурных объектов, вызывающих планировочное, объемно-пространственное и функциональное разрушение; установление последовательных связей разрушения и выделение площадей по степени разрушения для определения необходимых методов восстановительно-реконструктивных преобразований (ВРП) для исправления.

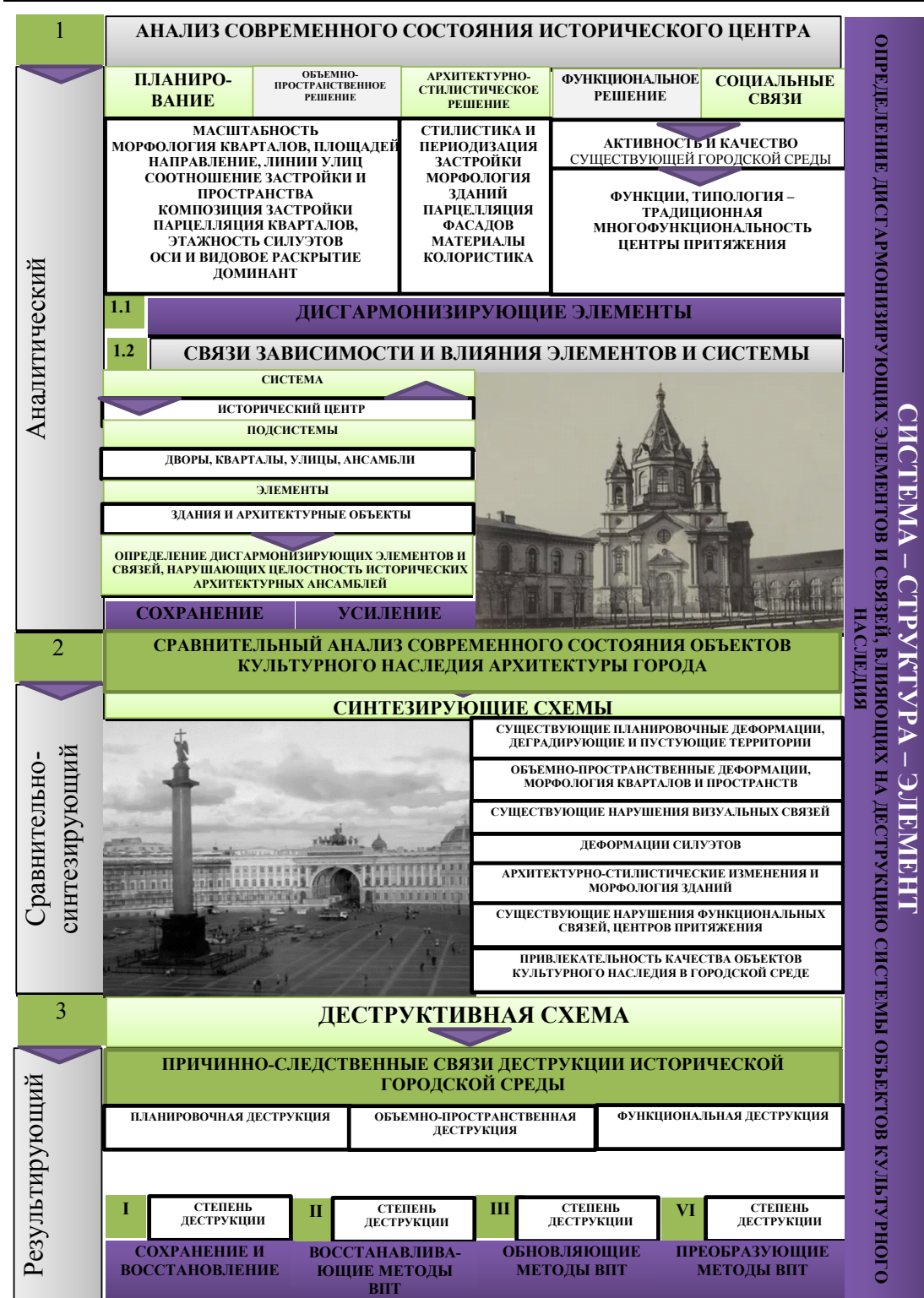
Ключевым методом является метод системно-структурного анализа. Методика состоит из трех последовательных этапов (аналитический, сравнительно-синтезирующий, результирующий) проведения исследования архитектурных объектов по схеме: система – структура – элемент (см. рисунок) [2, 3].

Как материальные, так и нематериальные компоненты изменяются во времени, оказывают взаимное влияние на развитие системы в целом. Это позволяет проанализировать все элементы архитектурных объектов культурного наследия как целостную динамическую систему и выявить внутренние связи зависимости и влияния между ними. Метод позволяет выяснить внутреннюю организацию объекта и выявить дисгармонизирующие элементы и причинно-следственные связи, которые повлияли на его разрушение [4]. Предложена следующая последовательность этапов исследования архитектурных объектов (см. рисунок).

Аналитический этап. Анализ современного состояния архитектурных объектов культурного наследия (например такой градостроительной единицы, как город) включает:

- планировку и трехмерное решение (масштаб; морфология кварталов, площадей; направления, красные линии улиц; соотношение зданий и открытых пространств; композиция зданий; парцелляция кварталов, этажность зданий; силуэт; оси восприятия и доминанты);
- архитектурно-стилистическое решение здания (стилистика и периодизация; морфология зданий (тип крыши, уклон скатов, наличие и форма фронтонов); парцелляция фасадов; материалы; колорит);
- функционально-инфраструктурное решение (функции и характеристики существующих зданий; традиции в функциональном наполнении; активность и качество существующей исторической городской среды за счет сохранения традиционной многофункциональности: равномерность распределения функций (транспортная, пешеходная и «зеленая» зоны));
- социальные отношения (для определения качества существующей городской среды для проживания и длительного пребывания в ней: жилье – работа – места досуга, т.е. наличие мест, связанных с обязательными и необязательными социальными практиками – центрами притяжения).

Проведенный анализ фактически является основой для выявления дисгармонизирующих элементов, вызывающих разрушение системы, и определения новых элементов, необходимых для ее восстановления. Выделяются типы взаимосвязей зависимости и влияния элементов и системы с целью выявления деструктивных изменений в связях, приводящих к нарушению целостности системы, а также сохранения существующих исторических объектов, их развития и добавления новизны до момента восстановления целостности архитектурного ансамбля. Определяется существующая иерархическая зависимость каждого элемента в системе объектов культурного наследия городов России, что позволяет понять связи этих элементов и установить их взаимное влияние. Каждый элемент системы имеет свое конкретное значение, расположение; форма и назначение являются его триггерами качества в системе (сформировалась под влиянием определенных переменных во времени социокультурных и экономических обстоятельств; зависима, и сама влияет на другие элементы своей подсистемы, а через свои акценты и доминанты связана с другими элементами более высокого уровня общей системы) [5].



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСГАРМОНИЗИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СВЯЗЕЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДЕСТРУКЦИЮ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

СИСТЕМА – СТРУКТУРА – ЭЛЕМЕНТ

Методика детерминации степени деструкции объектов культурного наследия городских ансамблей

Сравнительно-синтезирующий этап. Проводится сравнительный анализ современного состояния архитектурных объектов культурного наследия города с элементами исторического анализа; включаются синтезирующие графические схемы:

– существующей планировочной деформации, деградации и «пустых» территорий (определяется, какие элементы планировки исчезли, какие были изменены (в размере,

форме, направлении), какие дополнения произошли и как это повлияло на общую планировку архитектурных объектов культурного наследия и их деятельность);

- трехмерной деформации, морфологии строительных блоков и открытых пространств (определение элементов и подсистем, вызывающих деформации с точки зрения масштаба и композиции зданий);

- существующих и нарушенных визуальных связей (выявление дисгармонизирующих элементов, разрушающих визуальные связи в подсистемах и нарушающих целостное визуальное восприятие архитектурных объектов культурного наследия; определение новых элементов, необходимых для восстановления целостности исторического здания);

- деформации силуэта (выявление дисгармонизирующих зданий, вносящих негативные изменения; определение нежелательных потерь, вызывающих «провалы» или обедняющих силуэт);

- архитектурно-стилистических изменений и морфологии зданий (схемы зданий для установления объемной и архитектурно-стилистической деформации с выделением зданий, которые нарушают исторически сложившуюся этажность и не поддерживают историческую парцелляцию и морфологию);

- существующих и нарушенных функциональных связей, центров притяжения (определение функциональной активности и наличия монофункциональных территорий; зданий (памятников) и территорий, которые не используются или неправильное использование которых вызывает их деградацию и разрушение как архитектурных объектов культурного наследия);

- привлекательности (активность и качество) существующей городской среды (экологичность, культурная целостность, социальная активность, экономическая привлекательность).

По этим схемам и устанавливались планировочное, объемно-пространственное и функциональное разрушения архитектурных объектов культурного наследия [6, 7].

Итоговый этап. Здесь указываются взаимно разрушающие связи архитектурных объектов культурного наследия; составляются деструктивные схемы с выделением площадей по степени разрушения. Так устанавливались последовательные связи планировочной, объемно-пространственной и функциональной разрушенности архитектурных объектов.

Особое внимание уделялось *планированию и трехмерному разрушению*.

Изменение (увеличение) размеров площадей и кварталов, расширение красных линий и изменение направлений улиц вызывают нарушение целостности исторической морфологии и утрату идентичности исторической городской среды.

Строительство транзитно-транспортной магистрали через исторический центр города приводит к снижению его экологической привлекательности и безопасности.

Разрушение исторических зданий и строительство новых без учета исторической планировки влекут за собой утрату отдельных элементов планировки и нарушение целостности подсистем архитектурных объектов культурного наследия.

При изменении плотности застройки (соотношения зданий и открытого пространства) нарушается композиционная целостность из-за нежелательных композиционных разрывов.

Утрата исторической доминанты, основного элемента одной из подсистем (например площади), приводит к нарушению целостности всей системы (архитектурных объектов культурного наследия и города).

При возведении новых доминант без учета исторически сложившегося контекста возникают нарушения композиционной целостности и деформации силуэта.

Утрата исторической рядной застройки, которая традиционно служила фоном для памятников – исторических акцентов и доминант, приводит к нарушению целостности системы, потере традиционного характера исторической городской среды, ее историко-архитектурной ценности. К сожалению, в настоящее время в большинстве городов России можно встретить лишь единичные примеры исторических рядных построек. Следовательно, о традиционном характере их исторических рядных зданий

во многих случаях можно судить только по сохранившимся планам и иконографиям. Однако именно обычные здания составляют большинство в городе и в значительной степени формируют его атмосферу. Обычные постройки позволяют человеку правильно воспринимать акценты и доминанты, дают возможность их различать и запоминать. У человека развивается чувство целостности и привлекательности городской застройки [8].

Введение новых малогабаритных рядных зданий вызывает масштабную деформацию исторической городской среды, нарушение визуальных связей в ней и целостного визуального восприятия архитектурных объектов культурного наследия.

Отказ от исторических зданий снижает их ценность и качество исторической городской среды в целом, ее стягиваемость.

Нарушение традиционной этажности, парцелляция фасадов, изменение типа крыши, уклонов скатов, а также традиционной цветовой гаммы приводят к масштабной и архитектурно-образной деформации архитектурных объектов культурного наследия, утрате «духа места».

Функциональное разрушение. Неправильное использование исторического здания (памятника архитектуры) часто приводит к неправильным дополнениям к нему или утрате деталей и декора, в результате снижается его архитектурная и культурная ценность.

Неиспользование исторического здания (памятника), территории приводит к утрате их социальной, экономической и архитектурной ценности, деградации и разрушению. Такие здания или территории сначала теряют свою утилитарную и социальную ценность, затем архитектурную ценность, что приводит к их деградации, а со временем – разрушению и запустению. В результате нарушается целостность всей системы.

Введение новой («чужой») функции также приводит к нарушению целостности и утрате идентичности исторической среды. Часто неправильная новая функция только для одного нового или существующего здания требует расширения транспортной уличной сети, при этом исчезает идентичность всей системы (архитектурных объектов культурного наследия).

Функциональное обеднение исторической среды (смещение центров тяжести за пределы архитектурных объектов культурного наследия) приводит к снижению ее социальной активности, экономической привлекательности, защищенности, а также ценности объектов культурного наследия.

Как правило, каждая из выявленных причин имеет несколько последствий. В то же время каждое следствие является результатом действий нескольких различных причин. Более того, планирование, трехмерное и функциональное разрушение архитектурных объектов культурного наследия взаимосвязаны и взаимозависимы. В совокупности они приводят к деструктивным изменениям в историческом центре, которые также можно отнести к *социально-экономическим разрушениям*, какими являются:

- деградация и утрата социально-экономической ценности памятников и исторических зданий; снижение социальной активности, экономической привлекательности и безопасности среды архитектурных объектов культурного наследия;
- потеря «духа места» и, соответственно, интереса туристов к посещению города;
- отсутствие интереса к инвестированию в этот город и, как следствие, снижение уровня его экономического развития;
- ухудшение качества жизни жителей.

Деструктивная схема, отражающая нарушение целостности архитектурных объектов культурного наследия, выполняется путем объединения этих синтезирующих схем в единую деструктивную схему с выделением площадей по степени разрушения методом генерализации.

Нами рассматривались четыре степени разрушения участков архитектурных объектов культурного наследия:

I степень разрушения – участки с фрагментарными разрушениями, отсутствием дисгармоничной застройки (сохраняются все составляющие элементы, их размеры, форма, связи и значимость в общей системе архитектурных объектов);

II степень разрушения – участки с точечным разрушением, одиночные дисгармоничные здания (незначительные деструктивные изменения, в частности утрата частей обычной исторической застройки, не разрушающие общую композицию здания, не изменяющие планировку, форму и размеры площадей, кварталов, направлений улиц; разрушающее воздействие может быть полностью устранено ВРП);

III степень разрушения – районы со значительными планировочными и объемно-пространственными разрушениями, наличием дисгармоничной застройки (из-за утраты исторических доминант, акцентов, частей обычной застройки или появления новых, нарушивших общую композицию исторической застройки, деформировавших форму и размеры площадей, кварталов, направлений улиц; деструктивная промывка может быть уменьшена только ВРП);

IV степень разрушения – разрушенные или деградировавшие участки в результате современного неиспользования, наличие дисгармонизирующих зданий (районы с разрушением исторической застройки, которое привело к утрате исторической планировки; исчезновение исторических кварталов, уличных школ; деструктивное влияние существующих дисгармонизирующих элементов может быть устранено только их сносом).

Степень разрушения участка влияет на выбор необходимых методов ВРП для его исправления, а именно: I степень разрушения – *сохраняющая* и *восстанавливающая*; II – *восстановительная*; III – *обновление*; IV – *трансформирующая*.

Заключение. Корректировки в использовании тех или иных методов ВРП могут происходить после сравнения схемы степеней разрушения участков со схемой их степеней ценности, причем последняя является определяющей. Кроме того, каждая последующая (большая) степень разрушения предусматривает возможность использования как основных соответствующих методов ВРП для ее снижения или устранения, так и тех методов, которые рекомендуется применять при предыдущих, (меньших) разрушениях.

В связи с этим, прежде чем внедрять какие-либо ВРП при проектировании любого нового элемента в историческом центре, требуется определить его влияние на уже сложившуюся систему и то, каким должен быть новый элемент (место, объем, форма, функция), чтобы деликатно вписаться в существующий контекст, не нарушить существующие связи, компенсировать недостающие и улучшить качество архитектурного ансамбля.

Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, пофакторный и историко-генетический анализ / И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 192–199.
2. Мирхасанов, Р.Ф. Особенности формирования «Новой архитектуры» на примере пяти отправных точек Огюста Перре / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Инженерные исследования. – 2024. – № 3 (18). – С. 20–26.
3. Радионов, Т.В. Архитектура научно-технологических комплексов нового поколения в городах Донбасса / Т.В. Радионов, В.А. Бугайчук // Строитель Донбасса. – 2024. – № 2 (27). – С. 6–1.
4. Гойкалов, А.Н. Разработка метода оценки качества архитектурно-исторической среды / А.Н. Гойкалов, Т.В. Макарова, А.Ю. Семенихина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 1(39). – С. 73–79.
5. Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития / Г.В. Есаулов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №. 6. – С. 9–25.

6. Лызина, А.Г. Эволюция планировки бесстолпного и крестово-купольного типов православного храма XVIII – начала XX века на территории Пензенской области / А.Г. Лызина // Архитектон: Известия вузов. – 2015. – № 3 (51). – С. 18–19.
7. Данилов, А.М. Методологическая парадигма естественных наук: системный подход / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3 (28). – С. 161–165.
8. Лаврухин, А.Н. Фактор историко-культурного наследия в системе жизнедеятельности города / А.Н. Лаврухин // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 5. – С. 178–181.

References

1. Garkin, I.N. Historical and architectural value of cultural heritage sites: assessment methods, factorial and historical-genetic analysis / I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 1 (62). – P. 192–199.
2. Mirkhasanov, R.F. Features of the formation of the «New Architecture» on the example of five starting points of Auguste Perret / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Engineering research. – 2024. – No. 3 (18). – P. 20–26.
3. Radionov, T.V. Architecture of new generation scientific and technological complexes in the cities of Donbass / T.V. Radionov, V.A. Bugaychuk // Builder of Donbass. – 2024. – No. 2 (27). – P. 6–1.
4. Goykalov, A.N. Development of a method for assessing the quality of the architectural and historical environment / A.N. Goykalov, T.V. Makarova, A.Yu. Semenikhina // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. – 2022. – No. 1 (39). – P. 73–79.
5. Esaulov, G.V. Sustainable Architecture – from Principles to Development Strategy / G.V. Esaulov // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – No. 6. – P. 9–25.
6. Lyzina, A.G. Evolution of the Layout of Pillarless and Cross-Dome Types of Orthodox Churches of the 18th – Early 20th Centuries in the Penza Region / A.G. Lyzina // Architecton: News of Universities. – 2015. – No. 3 (51). – P. 18–19.
7. Danilov, A.M. Methodological paradigm of natural sciences: systems approach / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 3 (28). – P. 161–165.
8. Lavrukhin, A.N. Factor of historical and cultural heritage in the system of city life / A.N. Lavrukhin // Innovations and investments. – 2019. – No. 5. – P. 178–181.

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

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник научно-
исследовательского сектора
E-mail: ambereg@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Beregovoy Aleksandr Marcovich,
Doctor of Sciences, Professor, Chief
Researcher of the Research Sector
E-mail: ambereg@rambler.ru

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ОДНО- И МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.М. Береговой

Дана оценка влиянию локальных критериев оптимальности и порядка расположения конструктивных слоев в наружных ограждениях на энергосбережение в зданиях при воздействии экстремальных климатических факторов. Определены и оптимизированы в качестве этих критериев теплотехнические показатели ограждающих конструкций, повышающие энергетический эффект и улучшающие микроклимат помещений в зависимости от особенностей климатического воздействия. На основе расчетного моделирования найдены величины: экономии тепла при инфильтрации прогретого воздуха через ограждение по сравнению с его притоком через вентиляционное отверстие, дополнительных тепловых потерь через конструкцию наружной стены в зависимости от ее тепловой инерции при резком похолодании, а также при сочетании двух факторов воздействия – «влажного» или «мокрого» режима помещений и резкого снижения температуры наружного воздуха. Сделан выбор эффективных конструктивных решений наружных ограждений для проектирования в условиях большой амплитуды колебаний температуры наружного воздуха, ветрового напора, «влажного» и «мокрого» режимов помещений, резкого похолодания.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, тепломассоперенос, инфильтрация воздуха, климатические воздействия, локальные критерии оптимальности, тепловая инерция, теплоусвоение, амплитуда колебаний температуры

HEAT AND MASS TRANSFER IN SINGLE- AND MULTI-LAYERED ENCLOSING STRUCTURES UNDER EXTREME CLIMATIC CONDITIONS

A.M. Beregovoy

An assessment of the influence of local criteria of optimality and the order of arrangement of structural layers in external enclosing structures on energy saving in buildings under the influence of extreme climatic factors is given. The thermal engineering parameters of enclosing structures, which increase the energy effect and improve the indoor microclimate, depending on the characteristics of the climatic effect, have been identified and optimized as these criteria. Based on computational modeling, the values are found: heat savings during the infiltration of heated air through the enclosure compared to its inflow through the vent, additional heat losses through the construction of the exterior wall, depending on its thermal inertia during a sudden cold snap, as well as when two factors of influence are combined – «wet» or «very wet» indoor conditions and a sharp decrease in outdoor temperature. The choice of effective structural solutions for external enclosing structures for design in

conditions of a large amplitude of fluctuations in outdoor air temperature, wind pressure, «wet» and «very wet» indoor conditions, and sudden cold snap has been made.

Keywords: enclosing structures, heat and mass transfer, air infiltration, climatic influences, local optimality criteria, thermal inertia, heat absorption, amplitude of temperature fluctuations

Конструктивное решение наружных ограждений энергоэффективного здания должно обеспечивать энергосберегающий эффект и формирование комфортного микроклимата помещений. На выбор теплотехнических показателей этих конструкций большое влияние оказывает целый ряд факторов, включающий особенности климата района строительства, режим отопления здания, физико-механические характеристики материалов конструктивных слоев и порядок расположения последних в наружном ограждении.

Вопросы энергосбережения и конструктивных решений наружных ограждений зданий в различных климатических условиях рассматриваются в целом ряде работ. Влияние изменения климатических параметров на баланс энергопотребления в процессе отопления здания, подогрева холодного приточного воздуха и роста расхода холода на охлаждение летом рассмотрено в [1]. Взаимосвязь особенностей светового климата и энергосбережения в зданиях установлена в [2], а анализ использования промышленных ограждающих конструкций в различных природно-климатических условиях представлен в [3].

В поставленную задачу исследования входила оценка комплекса теплотехнических показателей одно- и многослойных наружных ограждающих конструкций, способствующего улучшению теплового режима и воздухообмена помещений при экстремальных климатических воздействиях. При исследовании механизма воздействия климата на энергосбережение в здании были рассмотрены следующие экстремальные или близкие к экстремальным климатические факторы:

1. Большая амплитуда колебаний температуры t_n наружного воздуха.
2. Ветровой напор при $t_n < 0$.
3. Влажный» или «мокрый» режим помещений.
4. Резкое снижение температуры t_n наружного воздуха.

При этом принято допущение, что в течение некоторого времени z на здание оказывает воздействие тот или иной климатический фактор или сочетание нескольких из них. Тогда суммарную величину обобщенного критерия энергоэффективности K_{ui} в промежутках времени воздействия $z_1 \dots z_{10}$ климатических факторов можно выразить так:

$$\begin{aligned}
 & \text{для фактора 1} \\
 K_{ui}^* &= \sum_{z_1}^{z_2} \sum_{j=1}^n k_{ij} q_j + \sum_{z_1}^{z_2} \sum_{j=1}^n k_{ij}^* q_j^* r \\
 & \text{для фактора 2} \\
 & + \sum_{z_3}^{z_4} \sum_{j=1}^n k_{ij} q_j + \sum_{z_3}^{z_4} \sum_{j=1}^n k_{ij}^* q_j^* r \\
 & \text{для фактора 3} \\
 & + \sum_{z_5}^{z_6} \sum_{j=1}^n k_{ij} q_j + \sum_{z_5}^{z_6} \sum_{j=1}^n k_{ij}^* q_j^* r \\
 & \text{для фактора 4} \\
 & + \sum_{z_7}^{z_8} \sum_{j=1}^n k_{ij} q_j + \sum_{z_7}^{z_8} \sum_{j=1}^n k_{ij}^* q_j^* r
 \end{aligned}$$

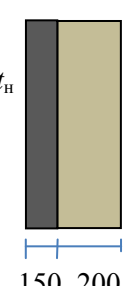
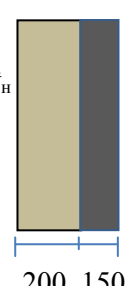
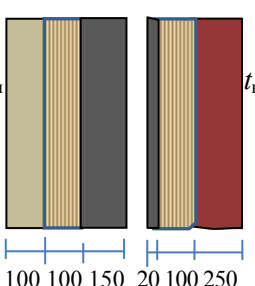
где $\sum \sum$ – обозначает сумму по двум переменным – z и $q_j \cdot k_{ij}$, z и $q_j^* \cdot k_{ij}^* \cdot r$ (знак * указывает на сочетание локальных критериев, вызывающих понижающий эффект в энергосбережении).

В комплексный критерий K_{ui} входят локальные критерии оптимальности k_{ij} , коэффициенты весомости q_j , а также коэффициенты понижения r величины некоторых

локальных критериев, определяемые на основании расчетов или экспериментальным путем.

В ходе вариантного проектирования предпочтение отдается тем локальным критериям k_{ij} и их коэффициентам весомости q_i , которые в условиях воздействий экстремальных климатических факторов оказывают наибольшее влияние на величину K_{ui} . Выбор таких показателей и коэффициентов основывается на анализе рассматриваемых теплотехнических качеств конструкций наружных ограждений, примеры которых и влияние климатических факторов на протекающие в них процессы теплопереноса показаны в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Климатические факторы	Конструктивные схемы наружных ограждений			
	1	2	3	4 5
				
Фактор 1	Показатели объемной теплоемкости $C_0 \gamma$, тепловой инерции D и теплоусвоения ограждающих конструкций $Y_{огр}$ формируют тепловой режим помещений			
Фактор 2	Инфильтрация и экономайзерный эффект у легких бетонов	Сильное снижение инфильтрации и экономайзерного эффекта	Эти процессы теплопереноса зависят от величины $\sum R_i$ конструкций ограждений	
Фактор 3	Сорбционное увлажнение	Сверхсорбционное увлажнение	Сорбционное увлажнение	Увлажнение зависит от R_n наружного слоя

П р и м е ч а н и е. Наименование и материалы конструктивных схем 1...5 ограждений: 1 – однослойная из легкого или ячеистого бетона, тяжелого композита; 2 – двухслойная с наружным плотным бетонным слоем и внутренним из легкого или ячеистого бетона; 3 – та же конструкция с другим расположением слоев; 4 – трехслойная с наружным и внутренним слоями из легкого или тяжелого бетона и средним из эффективного утеплителя; 5 – трехслойная с наружным защитным слоем из цементно-песчаного раствора по армирующей сетке, внутренним несущим слоем из кирпичной кладки и средним из эффективного утеплителя.

Анализ первого фактора влияния на энергосбережение в зданиях показал:

1. Для климата нашей страны характерны значительные суточные изменения амплитуды колебаний температуры A наружного воздуха. Максимальные их значения для второй климатической зоны могут достигать в жаркий и холодный периоды года соответственно 18 и 22 °С (г. Пенза), а для первой климатической зоны – в полтора раза больше (г. Магадан).

2. В условиях значительных колебаний показателя A при проектировании энергоэффективных зданий востребованы наружные ограждающие конструкции, имеющие большую теплоаккумулирующую способность, определяемую объемной теплоемкостью, $C_0 \gamma$, кДж/(м³·°С), а также такое расположение конструктивных слоев и капиллярно-пористую структуру материала, которые позволяют регулировать в широких пределах протекающие в них процессы теплопереноса. Эти

конструкции представляют собой стабильную систему регулирования микроклимата здания, позволяющую снижать расход тепловой энергии на его отопление и формировать комфортный тепловой режим.

3. Применяемые в практике проектирования общепринятые инженерные и архитектурно-строительные способы не могут полностью решить проблему борьбы с охлаждением здания при резких похолоданиях, а также отключениях системы отопления или при перегреве помещений с наступлением жаркого периода. Так, например, использование системы кондиционирования, хотя и помогает решить первое основное требование, предъявляемое к энергоэффективному зданию по формированию комфортного микроклимата помещений, но не вполне удовлетворяет второму, так как при этом существенно возрастает расход энергоресурсов. Способ повышения теплоизоляционных свойств наружных ограждений здания за счет значительного увеличения сопротивления теплопередаче сверх нормативных требований экономически нецелесообразен и не устраняет возможности перегрева помещений при интенсивной солнечной радиации или их сравнительно быстрого охлаждения.

Показанная в табл.1 однослойная конструкция по схеме 1 из обычного бетона может обладать значительной теплоаккумулирующей способностью, если материал ограждения имеет высокую плотность. Однако требованиям, предъявляемым к наружному ограждению здания, эта конструкция не удовлетворяет, так как для создания достаточных теплоизоляционных свойств ее толщина должна быть неоправданно большой. В другом варианте этой конструкции, предназначенном для защиты зданий от радиации, использован разработанный на кафедре ТСМиД Пензенского ГУАС тяжелый композит с заполнителем из отходов свинцово-содержащего стекла. Удельная теплоемкость у такого композита C_0 , кДж/(кг·°C), сравнительно невелика, однако благодаря высокой плотности, превышающей 4 000 кг/м³, его величина объемной теплоемкости $C_0 \cdot \gamma$ больше, чем у тяжелого бетона. Результаты исследований этой кафедры показали, что однослойная конструкция из этого композита имеет хорошие теплоизоляционные свойства, так как его коэффициент теплопроводности находится в пределах 0,25...0,5 Вт/(м·°C) и сопоставим с этим показателем для ячеистых бетонов.

В отличие от конструкции по схеме 2 наружные ограждения по схемам 3–5 с внутренним теплоаккумулирующим слоем активно участвуют в теплообмене с внутренней воздушной средой, способствуя выравниванию температуры ее воздуха при резких колебаниях амплитуды температуры окружающей среды. Сочетание высоких теплоизоляционных и теплоаккумулирующих свойств позволяет обеспечить быстрое затухание амплитуды колебаний температуры в таких ограждениях.

Этот эффект еще больше повышается в последних двух конструктивных схемах с теплоизоляционным слоем низкой плотности, но особенно в ограждении по схеме 4 в том случае, если слой со стороны помещения выполнен из тяжелого бетона или композита упомянутого состава. Результаты расчетного моделирования теплоаккумулирующей способности и теплоусвоения ограждающих конструкций показали:

- теплоотдача внутренней теплоаккумулирующей конструкции из тяжелого бетона плотностью 2350 кг/м³ и объемом 12 м³ при отключении отопления здания на период 12 ч может обеспечить поступление в помещение до 20 % теплоты от того количества, которое способна сгенерировать система отопления;

- в условиях поступающего в помещение лучистого тепла солнечной радиации с амплитудой $A_{q.} = 500$ Вт в помещении с ограждениями, имеющими относительно большую теплоаккумулирующую способность и тепловую инерцию ($D > 2,3$), могут наблюдаться колебания температуры поверхности этих конструкций, не превышающие 1 градус Цельсия.

Анализ второго фактора влияния на энергосбережение показал, что при ветровом напоре и низкой температуре воздуха нецелесообразно устройство наружного слоя ограждения повышенной плотности с высоким сопротивлением воздухопроницанию $R_{и}$ с целью уменьшения охлаждения массива конструкции и тепловых потерь. Так, конструкция стены по схеме 2 с таким слоем имеет большую величину показателя $R_{и}$

даже при наличии относительно воздухопроницаемого внутреннего слоя из легкого или ячеистого бетона. Однако такое расположение плотного слоя является причиной скопления под ним жидкой влаги при диффузии потока водяного пара через ограждение в отапливаемых зданиях. Кроме того, увеличиваются тепловые потери в результате существенного уменьшения экономайзерного эффекта. В таких районах с большой скоростью ветра целесообразно использовать другие способы ветровой защиты (ветроотбойный сайдинг, тепловое зонирование помещений, оптимальная ориентация здания по отношению к господствующему ветру и др.).

В результате проведенного исследования экономайзерного эффекта и расчетов по воздухопроницаемости наружных ограждений были определены:

1. Величина экономии тепла Q , которая возрастает с уменьшением показателя R_n ограждения и увеличением высоты здания. Если на первом этаже 2-этажного здания с относительно воздухопроницаемыми ограждениями (схемы 1 и 5) при температурах наружного и внутреннего воздуха -29 и $+20^\circ\text{C}$, скорости ветра $5,6$ м/с показатель Q может составить всего несколько процентов, то на этом же этаже 12-этажного здания с такими же ограждениями этот эффект увеличивается до $10 \dots 13 \%$.

2. Количество поступающего в помещение через массив ограждения подогретого наружного воздуха в процессе противоточного движения инфильтрующегося воздуха и уходящего теплового потока. Это увеличивает воздухообмен помещений и обеспечивает их воздушную среду вентиляционным воздухом, объем которого может быть более 40% от требуемого для воздухообмена жилого помещения средней площади.

В табл. 2 приведены результаты расчета количества инфильтрующегося воздуха $w_{\text{инф}}$ через стену по конструктивной схеме 1 для 12-этажного здания г. Пензы при $\Delta p = 45$ Па и максимальном значении средних скоростей ветра по направлениям в январе $v = 5,6$ м/с.

Т а б л и ц а 2

Количество инфильтрующегося воздуха $w_{\text{инф}}$ через стену из керамзитобетона
($\delta=35$ см, $\gamma = 1000$ кг/м³)

Значения величины $w_{\text{инф}}$, кг/(м ² ·ч)							
По расчету	0,12	0,023	0,23–0,56	2,22	1,07	2,5	1,07
Значения $w_{\text{инф}}$, кг/ч, через наружную стену площадью $8,5$ м ² для помещения площадью 12 м ²							
По расчету	1,02	0,20	2,0–4,76	18,8	9,10	21,3	9,10
В % от норматива	2,36	0,46	4,63–11,0	43,7	21,1	49,2	21,1

Результаты изучения третьего и четвертого факторов воздействия на энергосбережение в зданиях, основанные на ранее выполненных исследованиях [4], а также формулы расчетного моделирования и переменные k_{ij} и z в критерии K_{ui} показаны в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Процессы тепломассопереноса в наружных ограждающих конструкциях
при экстремальных воздействиях климатических факторов

Факторы	Переменные k_{ij} и z в критерии K_{ui}	Формулы расчетного моделирования	Показатели эффективности
1	2	3	4
Фактор 1	$k_{ij} \ll Q_{\text{выд}}$ $Q_{\text{выд}} = f(Q_{\text{ак}}, \theta_{\text{ср}})$ $z = 12$ ч $k_{ij} \ll A$ $A = f(D)$ $z = \text{до } 24$ ч	$Q_{\text{ак}} = c_0 \cdot \rho \cdot V (t_0 - t_{\text{ср}})$ $\theta_{\text{ср}} = (t_{\text{ср}} - \tau_{\text{в}}) / (t_0 - \tau_{\text{в}}) =$ $= (t_{\text{ср}} - t_{\text{кон}}) / (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}})$ $F_0 = 8,8 \cdot 10^{-4} \cdot 12 / 0,1^2 = 1,06$ $Y_{\text{огр}} = \sum Y_x \cdot F_x$ $A_{\tau} = A_q / \sum Y_{\text{п}} = A_q / \sum Y_x \cdot F_x$ $A_{\tau} = A_q / \sum Y_{\text{п}} = A_q / \sum Y_x \cdot F_x$ $Y_{\text{п}} = Y_{\text{огр}} = Y_x \cdot F_x$	Найдены: приблизительное количество теплоты $Q_{\text{выд}}$ выделяемой теплоаккумулирующей конструкцией при отключении отопления, и амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности ограждения A

1	2	3	4										
Фактор 2	$k_{ij} \ll \Rightarrow Q$ $Q = f(\Delta Q_{\text{вент}}, q_{\text{и}})$ $k_{ij} \ll \Rightarrow \omega$ $\omega = f(\Delta p / R_{\text{и}})$	$R_{\text{и}} = R_{\text{и1}} + R_{\text{и2}} + \dots + R_{\text{ин}}$ $\omega = \Delta p / R_{\text{и}}$ $\Delta Q_{\text{вент}} = 0,28 \cdot \Delta w_{\text{вент}} \cdot \gamma_{\text{и}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{и}})$ $q_{\text{и}} = \frac{c_{\text{в}} \cdot w \cdot e^{c_{\text{в}} \cdot w \cdot R}}{e^{c_{\text{в}} \cdot w \cdot R_0} - 1} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{и}})$	Определены: экономия тепла Q при экономайзерном эффекте в ограждении; количество прогретого через ограждение воздуха ω в % от норматива										
Фактор 3	$k_{ij} \ll \Rightarrow \lambda_{\text{в}}$ $\lambda_{\text{в}} = f(\lambda_{\text{с}}, \omega_0, \delta_{\omega})$ $k_{ij} \ll \Rightarrow \lambda_3$ $\lambda_3 = f(\lambda_{\text{в}}, \delta, \delta_3, t_{\text{с}}, t_3)$	$R_{\text{оп}} = R_{\text{вн}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\mu_n} + R_{\text{ип}}$ $R_{\text{п1}} = \frac{(e_{\text{в}} - E) R'_{\text{ип}}}{E - e_{\text{и}}}$ $R_{\text{п2}} = \frac{0,0024 z_0 (e_{\text{в}} - E_0)}{\gamma_{\omega} \delta_{\omega} \Delta \omega + \eta}$ $\lambda_{\text{в}} = \lambda_{\text{с}} \left(1 + \omega_0 \cdot \frac{\delta_{\omega}}{100} \right)$	Увеличение тепловых потерь через наружные ограждения по причине роста коэффициентов теплопроводности увлажненного и промерзшего материала может достигать: для кирпичной кладки 10 %, керамзитобетона 19 %, шлакобетона 22 %, пенобетона 25 %										
Сочетание факторов 3 и 4	$z_{x1} \dots z_{x2}, z_{x3} \dots z_{x4}$, – периоды влагонакопления в ограждении: зимний и многолетний $z_{x5} \dots z_{x6}$ – период низких температур – зимний и многолетний периоды влагонакопления ($R_{\text{п1}}$ и $R_{\text{п2}}$)	$r \cdot i \cdot u_{\text{ж}} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{d\delta_3}{dz} = \lambda_3 \cdot \frac{dt_3}{dx} - \lambda_{\text{в}} \cdot \frac{dt_{\text{в}}}{dx}$ $\lambda_3 \cdot \frac{t_3 - t_{\text{и}}}{\delta_3} - \lambda_{\text{в}} \cdot \frac{t_{\text{в}} - t_3}{\delta - \delta_3} = 0$											
Фактор 4	$k_{ij} \ll \Rightarrow \Delta Q_N$ $\Delta Q_N = f(D)$ $\Delta Z_{\text{р.п.}}$ – период резкого снижения температуры $t_{\text{и}}$ (в среднем 3...5 суток)	По Богословскому В.Н., $Q_N^{\text{max}} = [(t_{\text{в}} - t_{\text{и}}) \cdot n \cdot F_N \cdot \eta_N / R_{\text{Н.пр}}] + \Delta Q_N$, (Q_N^{max} – величина теплотерь в начале периода резкого снижения температуры $t_{\text{и}}$) $\Delta Q_N = \frac{\psi_N \cdot A_{\text{и}} \cdot n_N \cdot F_N (\Delta Z_{\text{р.п}} - \Delta Z_N)}{\Delta Z_{\text{р.п}} \cdot R_{\text{Н.пр}}}$ (ΔQ_N –дополнительные теплотери)	Установлена зависимость значений ΔQ_N , Вт/м ² , через наружные стены ($R=3,57 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$) от их тепловой инерции D : <table><tr><td>ΔQ_N</td><td>D</td></tr><tr><td>14,4</td><td>0,7</td></tr><tr><td>13,5</td><td>1,2</td></tr><tr><td>12,3</td><td>1,7</td></tr><tr><td>11,0</td><td>2,4</td></tr></table>	ΔQ_N	D	14,4	0,7	13,5	1,2	12,3	1,7	11,0	2,4
ΔQ_N	D												
14,4	0,7												
13,5	1,2												
12,3	1,7												
11,0	2,4												

Таким образом, результаты расчетного моделирования позволили сделать следующий выбор эффективных конструктивных решений наружных ограждений для проектирования в условиях экстремальных климатических воздействий.

1. Конструкции с высокими показателями теплоаккумулирующих, теплоизоляционных свойств и объемной теплоемкости, что обеспечивает быстрое затухание амплитуды колебаний температуры в толще ограждения и позволяет избежать дополнительных тепловых потерь через конструкции ограждений, – для проектирования в условиях больших колебаний амплитуды температуры окружающей среды и резкого снижения температуры наружного воздуха.

2. Многослойные конструкции ограждений со средним слоем из эффективной теплоизоляции и наружным слоем, плотность материала которого не превышает плотности внутреннего, – для проектирования в условиях ветрового напора в холодное время года. Выбор конструктивного решения с наружным слоем, имеющим большое

сопротивление воздухопроницанию, в сочетании с основным массивом ограждения из ячеистого или легкого бетона приводит к скоплению под наружным слоем жидкой влаги при диффузии потока водяного пара и увеличению тепловых потерь не только в результате повышения теплопроводности увлажненного материала, но и по причине существенного уменьшения экономайзерного эффекта.

3. Ограждающие конструкции с внутренним слоем, имеющим большое сопротивление паропроницанию, и эффективным теплоизоляционным слоем, который предотвращает фазовый переход влаги в капиллярно-пористой структуре материала, – для проектирования в условиях «влажного» или «мокрого» режима помещений в сочетании с низкой температурой наружного воздуха.

Список литературы

1. Самарин, О.Д. Оценка влияния изменения климата на энергопотребление систем обеспечения микроклимата зданий / О.Д., Самарин, К.И. Лушин // Жилищное строительство. – 2020. – № 1–2. – С. 21–24.

2. Коркина, Е.В. Исследование параметров светового климата при различных типах неба для обеспечения энергосбережения в зданиях / Е.В. Коркина, В.Г. Гагарин, И.А. Шмаров // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022–2023 годы : сборник научных трудов РААСН : в 2 т. – Москва, 2024. – С. 216–225.

3. Дерина, М.А. Применение промышленных стеновых конструкций в различных природно-климатических условиях / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2 (43). – С. 120–126.

4. Береговой, А.М. Тепловые потери через наружные ограждения в стадии увлажнения и промерзания материала / А.М. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №4. – С. 206–210.

References

1. Samarin, O.D. Assessment of the impact of climate change on the energy consumption of buildings microclimate systems / O.D., Samarin, K.I. Lushin // Housing construction. – 2020. – № 1–2. – P. 21–24.

2. Korkina, E.V. Investigation of the parameters of the light climate in various types of sky to ensure energy saving in buildings / E.V. Korkina, V.G. Gagarin I.A. Shmarov / Fundamental exploratory and applied research of the Russian Academy of Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2022–2023 : collection Scientific works of the Russian Academy of Sciences : in 2 volumes. – Moscow, 2024. – P. 216–225.

3. Derina, M.A. Application of industrial wall structures in various natural and climatic conditions/ M.A. Derina, L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2020. – №. 2 (43). – P. 120–126.

4. Beregovoy, A.M. Heat losses through external enclosures at the stage of wetting and freezing of the material / A.M. Beregovoy // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 4. – P. 206–210.

