

**Научно-практический сетевой журнал**  
**Выходит 2 раза в год**

**Учредитель и издатель**  
Пензенский государственный  
университет архитектуры  
и строительства

Главная редакция:  
В.А. Береговой (главный редактор)  
Б.М. Гришин (заместитель  
главного редактора)  
И.Ю. Шитова (ответственный секретарь)

Адрес редакции:  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,  
ПГУАС  
Тел/факс 8412 420501  
E-mail: techbeton@pguas.ru  
www.vestnikpguas.ru

Редактор М.А. Сухова

Корректор Н.В. Кучина

Дизайн обложки Л.А. Васин

Компьютерная верстка  
Н.А. Сазонова

Журнал зарегистрирован  
в Федеральной службе по надзору  
в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации  
Эл. № ФС77-61513 от 24 апреля 2015 г.

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.

# ВЕСТНИК ПГУАС: СТРОИТЕЛЬСТВО, НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ 1 (22)/2026

## Содержание

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА..... 3

**Бакушев С.В., Таилов Э.З.**  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В РАМАХ С УЧЁТОМ  
ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ..... 3

**Береговой В.А., Семилетков А.В.**  
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА  
МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ  
НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ДОЛОМИТОВ..... 10

**Коровкин М.О., Ерошкина Н.А.,  
Шестернин А.И., Бодров И.Д.,  
Глебова Т.В.**  
ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРНЫХ ФАКТОРОВ  
НА СВОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ  
ДОЛГОВЕЧНОСТЬ  
САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ  
МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА..... 17

**Коровкин М.О., Ерошкина Н.А.,  
Михайлова Е.Д., Довгуль Е.Ю.,  
Журавлев С.И.**  
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОДБОРА  
ПИГМЕНТОВ В СОСТАВЕ ЦВЕТНОГО  
МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА..... 27

**Кузина В.В., Гвоздева О.М.**  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ  
И РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ  
УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ  
МАТЕРИАЛОВ..... 37

**Лавров И.Ю., Семилетков А.В.,  
Бортунова В.И.**  
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ ЦЕМЕНТНЫЙ  
КОМПОЗИТ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ  
3D-ПЕЧАТИ..... 42

**Мартышкин Д.О., Залилов И.В.,  
Арискин М.В.**  
НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ  
СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ БОЛТОВ  
С РАЗЛИЧНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ  
ПАРАМЕТРАМИ СОЕДИНЕНИЙ  
ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ..... 50

<b>Мартышкин Д.О., Меркушов А.В., Викторов В.В., Шибяев А.В.</b> НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТРОПИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ ЗАДАНИЯ ВРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК.....	57	<b>Очкин И.А., Симонов Т.Д., Грейсух Г.И., Захаров О.А., Очкина Н.А.</b> ПРОЧНОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ ТЯЖЕЛЫХ И ОСОБО ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ: ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ .....	73
<b>Махамбетова К.Н., Гуськова А.Г.</b> КИНЕТИКА ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОВРЕМЕННЫМИ ГИДРОФОБИЗАТОРАМИ .....	68		

## Contents

<b>CONSTRUCTION. ARCHITECTURE ...3</b>	<b>Martyshev D.O., Zalilov I.V., Ariskin M.V.</b> BEARING CAPACITY OF FIBERGLASS BOLTS WITH DIFFERENT PARAMETRES OF WOODEN STRUCTURES CONNECTIONS .....	50
<b>Bakushev S.V., Taibov E.Z.</b> DISPLACEMENTS IN FRAMES TAKING INTO ACCOUNT LONGITUDINAL AND TRANSVERSE FORCES.....	3	
<b>Beregovoy V.A., Semiletkov A.V.</b> IMPROVING THE QUALITY OF MAGNESIA BINDERS BASED ON NATURAL DOLOMITES .....	10	
<b>Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Shesternin A.I., Bodrov I.D., Glebova T.V.</b> INFLUENCE OF FORMULATION FACTORS ON THE PROPERTIES THAT DETERMINE THE DURABILITY OF SELF-COMPACTING FINE-GRAIN CONCRETE.....	17	<b>Martyshev D.O., Merkushev A.V., Viktorov V.V., Shibaev A.V.</b> STRESS-STRAIN STATE OF WOODEN LOAD-BEARING STRUCTURES OF A RAFTER SYSTEM WITH VARIOUS OPTIONS FOR SETTING TEMPORARY LOADS .....
<b>Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Mikhailova E.D., Dovgul E.Yu., Zhuravlev S.I.</b> DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR SELECTING PIGMENTS IN COLORED FINE-GRAIN CONCRETE.....	27	<b>Makhambetova K.N., Guskova A.G.</b> KINETICS OF WATER ABSORPTION AND FROST RESISTANCE OF CEMENT SYSTEMS MODIFIED WITH MODERN WATER-REPELLENTS .....
<b>Kuzina V.V., Gvozdeva O.M.</b> MATHEMATICAL DESCRIPTION AND CALCULATION OF METALLIZATION PROCESSES OF CARBON FIBRE MATERIALS.....	37	<b>Ochkin I.A., Simonov T.D., Greisukh G.I., Zakharov O.A., Ochkina N.A.</b> FLEXURAL STRENGTH OF HEAVY AND EXTRA HEAVY CONCRETE: INFLUENCING FACTORS AND METHODS OF IMPROVEMENT .....
<b>Lavrov I.Yu., Semiletkov A.V., Bortunova V.I.</b> DISPERSED-REINFORCED CEMENT COMPOSITE FOR CONSTRUCTION 3D PRINTING .....	42	73

---

# СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

# CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

УДК 539.3/6

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

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

**Бакушев Сергей Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Механика»

**Таилов Эльдар Замирович,**  
студент

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Bakushev Sergey Vasilevich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Mechanics»

**Taibov Eldar Zamirovich,**  
Student

## ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В РАМАХ С УЧЁТОМ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

С.В. Бакушев, Э.З. Таилов

Рассматриваются вопросы определения с использованием формулы Мора перемещений в заданных сечениях элементов рамы не только от изгибающего момента, но и с учётом как поперечных, так и продольных сил. Показано, что поперечные и продольные силы в элементах рамы практически не влияют на величину искомых прогибов в заданных сечениях элементов рамы, даже если элементы рамы выполнены из материалов с разными механическими характеристиками и имеют разные геометрические размеры поперечных сечений. Кроме того, перемещения в заданных сечениях элементов рамы, элементы которой выполнены из разных материалов и имеют разные геометрические размеры поперечных сечений, практически не зависят от механических характеристик элементов рамы, но сильно зависят от геометрических размеров поперечных сечений элементов рамы. Делается вывод о том, что перемещения в заданных сечениях элементов рамы, элементы которой выполнены из материалов с разными механическими характеристиками и имеют разные геометрические размеры поперечных сечений, следует определять только от действия внутренних изгибающих моментов без учёта продольных и поперечных сил.

*Ключевые слова: рама, перемещения, метод Мора, изгибающий момент, поперечная сила, продольная сила*

## DISPLACEMENTS IN FRAMES TAKING INTO ACCOUNT LONGITUDINAL AND TRANSVERSE FORCES

S.V. Bakushev, E.Z. Taibov

The problems of determining the displacements in the given sections of the frame elements using the Mohr formula not only from the bending moment, but also taking into account both transverse and longitudinal forces are considered. It is shown that the transverse and longitudinal forces in the frame

elements practically do not affect the value of the desired deflections in the specified sections of the frame elements, even if the frame elements are made of materials with different mechanical characteristics and have different geometric dimensions of cross-sections. In addition, the movements in the given cross-sections of the frame elements, the elements of which are made of different materials and have different geometric cross-sectional dimensions, practically do not depend on the mechanical characteristics of the frame elements, but strongly depend on the geometric dimensions of the cross-sections of the frame elements. It is concluded that the displacements in the specified sections of the frame elements, the elements of which are made of materials with different mechanical characteristics and have different geometric dimensions of cross-sections, should be determined only from the action of internal bending moments without taking into account longitudinal and transverse forces.

*Keywords: frame, displacements, Mohr method, bending moment, shear force, longitudinal force*

**Введение.** Элементы строительных конструкций и конструкции в целом должны удовлетворять как условиям прочности, так и условиям жёсткости. Последнее обеспечивается ограничением максимальных перемещений в опасных сечениях.

Вопросам оценки жёсткости строительных конструкций посвящены многие работы отечественных и зарубежных исследователей и инженеров. Так, в работе [1] рассматривается поведение монолитной железобетонной плиты, получившей на этапе строительных работ значительные прогибы, превышающие допустимые по 2-й группе предельных состояний. В статье [2] представлены математическая модель и метод расчета балок при изгибе, позволяющие определять перемещения в результате возникновения трещин. В работе [3] иллюстрируется универсальность метода Мора для определения перемещений в стержневых системах, в частности в плоских рамах. В статье [4] приведены результаты исследования проблемы определения перемещений элементов строительных конструкций – стержней, материал которых подчиняется диаграмме Прандтля. Введение приведенного момента позволило распространить формулу Мора – Максвелла за пределы линейной упругости, а использование классических физических моделей механики деформируемого твердого тела привело к решению проблемы в аналитическом виде. В работе [5] дано определение перемещений в сжато-изогнутых элементах при их работе за пределом упругости. В статье [6] предложен расчетный аппарат, позволяющий с единых позиций рассматривать вопросы деформативности железобетонных элементов сплошного и составного (сборно-монолитного) сечения, основанный на деформационной модели квазиоднородного сплошного тела с использованием нелинейной диаграммы деформирования бетона и кусочно-линейной диаграммы деформирования арматуры. В работе [7] рассматриваются вопросы деформативности изгибаемых железобетонных элементов переменной жёсткости. В статье [8] представлен метод Мора для определения перемещений в рамах, в результате чего делается вывод о том, что большая часть перемещения в системах, работающих на изгиб (балки, рамы), приходится на изгибающие моменты. Это обстоятельство позволяет при определении перемещений в балках и рамах пренебрегать влиянием продольных и поперечных сил. В работе [9] описываются методы определения перемещений в плоских стержневых конструкциях.

В данной работе рассматриваются возможность и необходимость учёта в формуле Мора, при определении перемещений в элементах рамы, продольных и поперечных сил.

**Основы теории.** В плоских рамах для определения перемещений в заданных сечениях элементов используется метод Мора [10]. При этом в формуле Мора, состоящей из шести слагаемых

$$\delta = \sum \int \frac{M_{xp} M_{x1}}{EI_x} dz + \sum \int \frac{M_{yp} M_{y1}}{EI_y} dz + \sum \int kx \int \frac{Q_{xp} Q_{x1}}{GA} dz + \sum \int ky \int \frac{Q_{yp} Q_{y1}}{GA} dz + \sum \int \frac{N_p N_1}{EA} + \sum \int \frac{M_{zp} M_{z1}}{GI_1} dz, \quad (1)$$

оставляют только одно, соответствующее изгибающим моментам [11]:

$$\delta = \sum \int \frac{M_{xp} M_{xl}}{EI_x} dz. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) записаны для горизонтально расположенного стержня, привязанного к системе координат  $X, Y, Z$ , причём ось  $Z$  направлена по оси стержня, ось  $Y$  – вертикально вверх, ось  $X$  – перпендикулярно к осям  $Z$  и  $Y$ .

Таким образом, перемещения в заданных сечениях элементов рамы определяются только от действия внутренних изгибающих моментов  $M_x$ . Влиянием поперечных  $Q_y$  и продольных  $N$  сил, действующих в элементах рамы, при этом пренебрегают. Предполагаем, что крутящие моменты  $M_z$  в элементах рамы не возникают.

Вместе с тем поперечные и продольные силы в элементах рамы могут быть значительными и, следовательно, могут существенно повлиять на величину искомых прогибов. Формула Мора (1) при учёте поперечных и продольных сил в элементах рамы будет иметь следующий вид:

$$\delta = \sum \int \frac{M_{xp} M_{xl}}{EI_x} dz + \sum ky \int \frac{Q_{yp} Q_{yl}}{GA} dz + \sum \int \frac{N_p N_l}{EA} dz. \quad (3)$$

Найдём условия, при которых при определении перемещений в сечениях элементов рамы следует пользоваться не формулой (2), а формулой (3).

**Пример расчёта.** Рассмотрим Г-образную раму, защемлённую нижним концом и нагруженную (для упрощения) только сосредоточенными силами (рис. 1, а).

Пусть длина стойки –  $l_1$ , длина ригеля –  $l_2$ . Сечение и стойки, и ригеля прямоугольное, сплошное, размерами  $b_1 \times h_1$  – для стойки,  $b_2 \times h_2$  – для ригеля. Расположение сечений в стойке и в ригеле показано на рис. 1, б. Отсчёт длин элементов рамы представлен на рис. 1, в. Механические характеристики материала элементов рамы следующие: в стойке – модуль упругости  $E_1$ , коэффициент Пуассона  $\mu_1$ ; в ригеле – модуль упругости  $E_2$ , коэффициент Пуассона  $\mu_2$ .

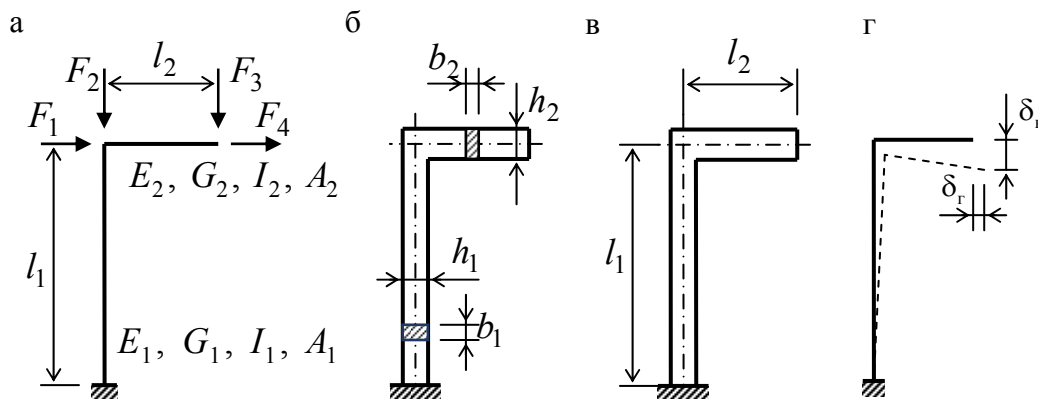


Рис. 1. Схема рамы

Под действием нагрузки рама деформируется (рис. 1, г). Требуется определить вертикальное  $\delta_b$  и горизонтальное  $\delta_r$  перемещения свободного конца рамы. Расчётные формулы при этом будут иметь вид:

$$\delta_b = \sum_{i=1,2} \frac{M_{pi} M_{li}}{E_i I_i} dz + \sum_{i=1,2} \frac{N_{pi} N_{li}}{E_i I_i} dz + \sum_{i=1,2} \frac{Q_{pi} Q_{li}}{E_i I_i} dz; \quad (4)$$

$$\delta_r = \sum_{i=1,2} \frac{M_{pi} M_{2i}}{E_i I_i} dz + \sum_{i=1,2} \frac{N_{pi} N_{2i}}{E_i I_i} dz + \sum_{i=1,2} \frac{Q_{pi} Q_{2i}}{E_i I_i} dz.$$

Грузовая и единичные эпюры показаны на рис. 2.

Таким образом, расчётные формулы (4), в соответствии с правилом Верещагина о перемножении эпюр, получают вид:

$$\delta_b = \left[ \frac{1}{E_1 I_1} \left( F_3 l_2 l_1 l_2 + \frac{1}{2} (F_4 l_1 + F_1 l_1) l_1 l_2 \right) + \frac{1}{E_2 I_2} \left( \frac{1}{2} F_3 l_2 l_2 \frac{1}{2} l_2 \right) \right] + \left[ \frac{1}{E_1 A_1} (F_2 + F_3 \cdot 1) \right] + \left[ k_1 \frac{1}{G_1 A_1} ((F_1 + F_4) l_1 \cdot 1) \right].$$

$$\delta_r = \left[ \frac{1}{E_1 I_1} \left( F_3 l_2 l_1 \frac{1}{2} l_1 + \frac{1}{2} (F_4 l_1 + F_1 l_1) l_1 \frac{2}{3} l_1 \right) \right] + \left[ \frac{1}{E_2 A_2} (F_4 l_2 \cdot 1) \right] + \left[ k_1 \frac{1}{G_1 A_1} ((F_1 + F_4) l_1 \cdot 1) \right]. \quad (5)$$

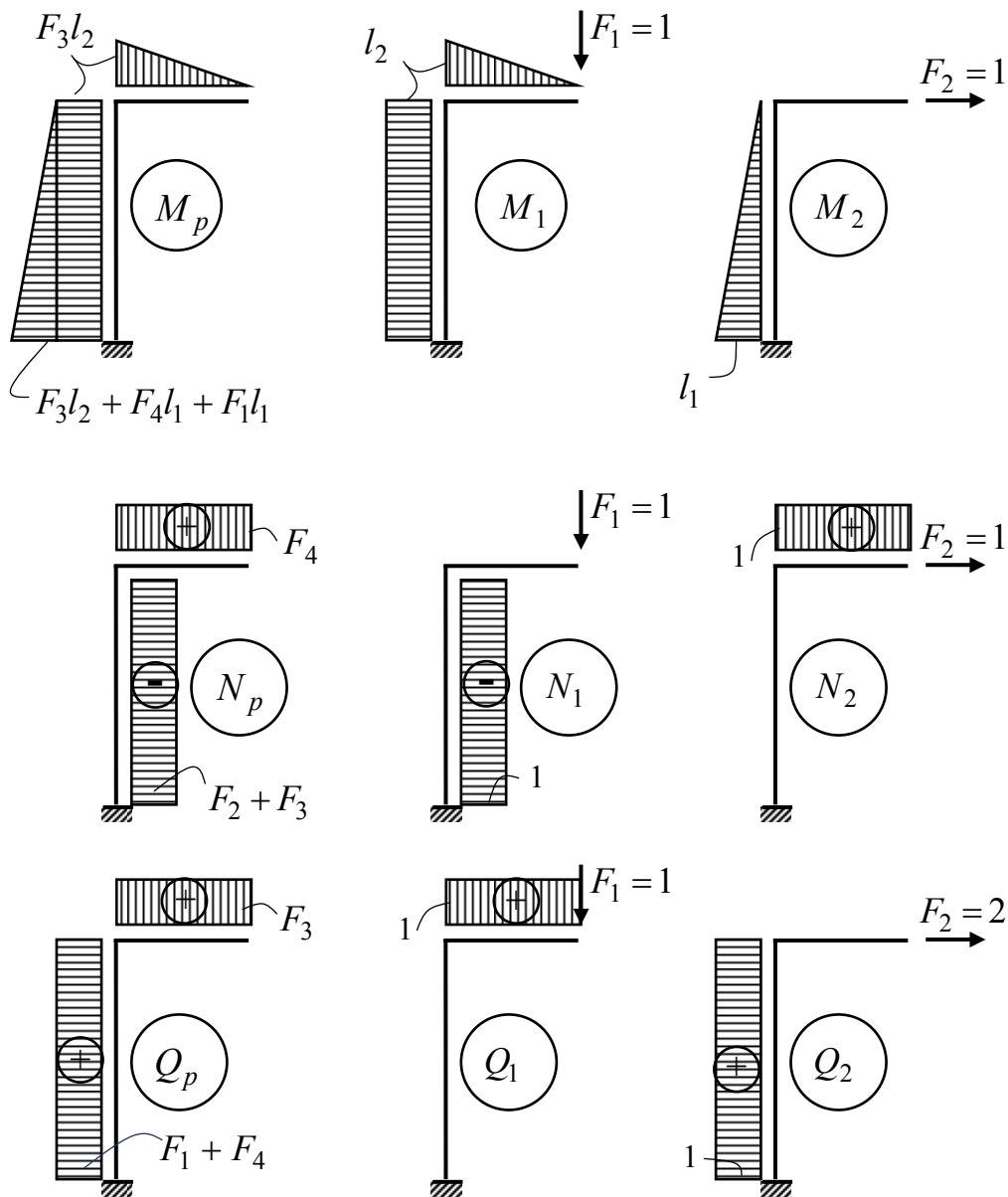


Рис. 2. Грузовая и единичные эпюры

В каждой из приведённых выше формул (5) первая квадратная скобка вычисляет соответствующее перемещение только от изгибающего момента, вторая квадратная скобка – соответствующее перемещение только от продольной силы, третья квадратная скобка – соответствующее перемещение только от поперечной силы в элементах рам.

**Результаты расчёта.** Исходные данные для расчёта:

$$F_1 = 0,01 \text{ кН}; F_2 = 0,2 \text{ кН}; F_3 = 0,03 \text{ кН}; F_4 = 0,05 \text{ кН};$$

$$E_1 = 200 \text{ ГПа}; E_2 = 70 \text{ ГПа}; \mu_1 = 0,30; \mu_2 = 0,34;$$

$$l_1 = 3 \text{ м}; l_2 = 1 \text{ м}; b_1 = 0,04 \text{ м}; h_1 = 0,02 \text{ м}; b_2 = 0,03 \text{ м}; h_2 = 0,01 \text{ м}.$$

Тогда

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1+\mu_1)} = 7874,02 \text{ МПа}; G_2 = \frac{E_2}{2(1+\mu_2)} = 2692,31 \text{ МПа};$$

$$I_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12} = 2,67 \text{ см}^4; I_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12} = 0,25 \text{ см}^4;$$

$$A_1 = b_1 h_1 = 8 \text{ см}^2; A_2 = b_2 h_2 = 3 \text{ см}^2.$$

Для сплошного прямоугольного поперечного сечения  $k_1 = k_2 = 1,2$ .

В результате получаем:

$$\delta_b = [12,46429] + [1,43750 \cdot 10^{-6}] + [4,59429 \cdot 10^{-4}] = 12,46475 \text{ см};$$

$$\delta_r = [12,65625] + [2,38095 \cdot 10^{-6}] + [3,51000 \cdot 10^{-4}] = 12,65684 \text{ см}.$$

Изменим исходные данные в части размеров поперечных сечений стойки и ригеля:

$$b_1 = 0,02 \text{ м}; h_1 = 0,04 \text{ м}; b_2 = 0,01 \text{ м}; h_2 = 0,03 \text{ м}.$$

В результате получим:

$$\delta_b = [2,32242] + [1,43750 \cdot 10^{-6}] + [4,59429 \cdot 10^{-4}] = 2,32288 \text{ см};$$

$$\delta_r = [3,16406] + [2,38095 \cdot 10^{-6}] + [3,51000 \cdot 10^{-4}] = 3,16465 \text{ см}.$$

Изменим исходные данные следующим образом:

$$E_1 = E_2 = 200 \text{ ГПа}; \mu_1 = \mu_2 = 0,30;$$

$$b_1 = b_2 = 0,04 \text{ м}; h_1 = h_2 = 0,02 \text{ м}.$$

В результате получаем:

$$\delta_b = [12,46428] + [1,43750 \cdot 10^{-6}] + [4,45714 \cdot 10^{-4}] = 12,46473 \text{ см};$$

$$\delta_r = [12,65625] + [2,38095 \cdot 10^{-6}] + [3,42900 \cdot 10^{-4}] = 12,65683 \text{ см}.$$

### **Выводы.**

1. Поперечные и продольные силы в элементах рамы практически не влияют на величину искомых прогибов в заданных сечениях элементов рамы, даже если элементы рамы выполнены из материалов с разными механическими характеристиками и имеют разные геометрические размеры поперечных сечений.

2. Перемещения в заданных сечениях элементов рамы, элементы которой выполнены из разных материалов и имеют разные геометрические размеры поперечных сечений, практически не зависят от механических характеристик элементов рамы, но сильно зависят от геометрических размеров поперечных сечений элементов рамы.

**Заключение.** Перемещения в заданных сечениях элементов рамы, элементы которой выполнены из материалов с разными механическими характеристиками и имеют разные геометрические размеры поперечных сечений, следует определять только от действия внутренних изгибающих моментов без учёта продольных и поперечных сил.

### Список литературы

1. Ли, А.В. Анализ конструктивных решений монолитной железобетонной плиты при установлении причины запредельных прогибов на этапе строительного периода / А.В. Ли, А.С. Васильев, В.Л. Земляк, В.Ю. Чжоу. – DOI: 10.60797/mca.2025.59.3 // Современное строительство и архитектура. – 2025. – № 4 (59).

2. Серазутдинов, М.Н. Определение перемещений балки с трещиной с использованием теории стержней / М.Н. Серазутдинов. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.10// Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 2 (68). – С. 114–123.

3. Кувшинова, А.С. Определение перемещений в плоской раме / А.С. Кувшинова, А.И. Демьянова // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2025. – С. 80–83.

4. Юрьев, А.Г. Перемещения в стержневых системах за пределом упругости / А.Г. Юрьев, Н.А. Смоляго, О.А. Яковлев. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31 // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 3. – С. 25–31.

5. Давидов, И.В. Определение перемещений в сжато-изогнутых элементах при их работе за пределом упругости / И.В. Давидов // Труды Харьковского инженерно-строительного института. – 1955. – Вып. 4. – С. 167–182.

6. Крючков, А.А. Напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов сплошного и составного сечения на основе уточненной нелинейной методики расчета / А.А. Крючков. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-82-91 // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 4. – С. 82–91.

7. Смоляго, Г.А. Расчет деформативности изгибаемых железобетонных элементов переменной жесткости / Г.А. Смоляго, А.Е. Жданов, Я.Л. Ищук, Н.В. Фролов // Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям : сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора, автора методики расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения, основоположника советской научной школы теории железобетона, основателя и первого заведующего кафедрой железобетонных конструкций Московского инженерно-строительного института (МИСИ) А.Ф. Лолейта / Лолейтовские чтения – 150. – Москва, 2018. – С. 385–390.

8. Борисенко, С.А. Определение перемещений в стержневых системах с учётом внутренних усилий, вызывающих перемещения / С.А. Борисенко, В.В. Алескеров // Сборник материалов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2021. – С. 1339–1342.

9. Попов, В.А. Определение перемещений в плоских стержневых системах / В.А. Попов, Д.В. Гулякин // Сборник трудов конференции. – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2017. – С. 92–93.

10. Александров, А.В. Соппротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потопов, Б.П. Державин ; под ред. А.В. Александрова. – 6-е изд., стер. – Москва : Высш. Шк., 2008. – 560 с.: ил.

## References

1. Li, A.V. Analysis of structural solutions of monolithic reinforced concrete slab in determining the cause of excessive deflections during the construction period / A.V. Li, A.S. Vasiliev, V.L. Zemlyak, V.Y. Zhou. – DOI: 10.60797/mca.2025.59.3 // Modern construction and architecture. – 2025. – No. 4 (59).
2. Serazutdinov, M.N. Determination of beam displacements with a crack using the theory of rods / M.N. Serazutdinov. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.10 // News of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2024. – No. 2 (68). – P. 114–123.
3. Kuvshinova, A.S. Determination of displacements in a flat frame / A.S. Kuvshinova, A.I. Demyanova // Collection of reports of the International Scientific and Technical Conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. – Belgorod, 2025. – P. 80–83.
4. Yuryev, A.G. Displacements in rod systems beyond the elastic limit / A.G. Yuryev, N.A. Smolyago, O.A. Yakovlev. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31 // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2022. – No. 3. – P. 25–31.
5. Davidov, I.V. Determination of displacements in compressed-curved elements during their operation beyond the elastic limit / I.V. Davidov // Proceedings of the Kharkov Institute of Civil Engineering. – 1955. – Issue 4. – P. 167–182.
6. Kryuchkov, A.A. Stress-strain state of bent reinforced concrete elements of continuous and composite sections based on a refined nonlinear calculation methodology / A.A. Kryuchkov. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-82-91 // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2022. – No. 4. – P. 82–91.
7. Smolyago, G.A. Calculation of deformability of bent reinforced concrete elements of variable rigidity / G.A. Smolyago, A.E. Zhdanov, Ya.L. Ishchuk, N.V. Frolov // Modern methods of calculating reinforced concrete and stone structures by limiting conditions: A collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Professor, author of the methodology for calculating reinforced concrete structures by the stage of destruction, founder of the Soviet scientific school of reinforced concrete theory, founder and first head of the Department of Reinforced Concrete Structures of the Moscow Institute of Civil Engineering (MISI) A.F. Loleita / Loleitovskiye chit – 150. – Moscow, 2018. – P. 385–390.
8. Borisenko, S.A. Determination of displacements in rod systems, taking into account internal forces causing displacement / S.A. Borisenko, V.V. Aleskerov // Collection of the materials International scientific and technical Conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. – Belgorod, 2021. – P. 1339–1342.
9. Popov, V.A. Determination of displacements in flat rod systems / V.A. Popov, D.V. Gulyakin // An article in the proceedings of the conference. – Krasnodar : Kuban State Technological University, 2017. – P. 92–93.
10. Alexandrov, A.V. Resistance of materials / A.V. Alexandrov, V.D. Potapov, B.P. Derzhavin ; Edited by A.V. Alexandrov. – 6th ed., ster. – Moscow : Higher School, 2008. – 560 p.: ill.
11. Leontiev, N.N. Fundamentals of structural mechanics of core systems / N.N. Leontiev. – Moscow : Publishing house DIA, 1996. – 541 p.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

**Семилетков Александр Викторович,**  
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»

**Semiletkov Aleksandr Viktorovich,**  
Assistant of the department «Building materials  
and woodworking technology»

E-mail: techbeton@pguas.ru

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ДОЛОМИТОВ

В.А. Береговой, А.В. Семилетков

Обоснована перспективность исследований в области технологий получения магнезиальных вяжущих на основе природных доломитов с низким содержанием  $MgCO_3$ . Описан механизм влияния параметров газовой среды печного пространства на выход  $MgO$  в рамках селективного термоллиза доломитовой породы. Приведены теоретические и экспериментальные данные, характеризующие влияние парциального давления  $CO_2$  на процесс обжига доломита.

*Ключевые слова:* магнезиальное вяжущее, добавки, термическое разложение, доломитовая порода

## IMPROVING THE QUALITY OF MAGNESIA BINDERS BASED ON NATURAL DOLOMITES

V.A.Beregovoy, A.V. Semiletkov

The article substantiates the prospects of research in the field of technologies for obtaining magnesia binders based on natural dolomites with low  $MgCO_3$  content. The mechanism of the influence of the parameters of the gas environment of the furnace space on the yield of  $MgO$  is described in the framework of the implementation of selective thermolysis of dolomite rock. Theoretical and experimental data are presented, characterizing the influence of the partial pressure of  $CO_2$  on the process of dolomite firing.

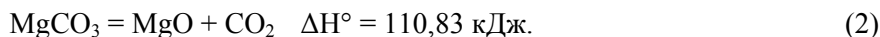
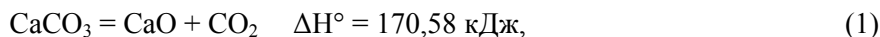
*Keywords:* magnesia binder, additives, thermal decomposition, dolomite rock

### Введение

В настоящее время активно разрабатываются строительные материалы, технологии получения которых характеризуются минимальным углеродным следом для окружающей среды [1]. Среди высокопрочных минеральных вяжущих, получаемых путем обжига при относительно низких температурах, выделяется группа магнезиальных веществ – каустические магнезит и доломит. С учетом доступности природного сырья и регионального аспекта, существенно влияющих на технико-экономические показатели конечного продукта [2], перспективы имеет каустический доломит. По состоянию на текущий момент считается, что целесообразность использования  $CaMg(CO_3)_2$  в качестве подходящего источника  $MgO$  в составе вяжущего обоснована, если данный показатель превышает 20 %. Вместе с тем, далеко не все местные доломиты могут обеспечить превышение порогового значения. Это указывает на важность исследований,

направленных на получение посредством обжига до 800 °С магнезиальных вяжущих, сопоставимых по прочности с современными видами портландцемента (40...50 МПа).

**Результаты исследований и обсуждение.** Реакции диссоциации карбонатов, входящих в состав доломитов, характеризуются тепловыми эффектами:



Различие величин  $\Delta H^\circ$  обуславливает возможность и эффективность селективного разложения  $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$  в направлении полезного выхода  $\text{MgO}$ . Условия разложения и выбор оптимальных режимов обжига во многом определяет эффективность работы печного оборудования. При обжиге горных пород используют газовые горелки, работающие при избытке кислорода, оцениваемым соответствующим коэффициентом  $\alpha = V_{\text{факт}}/V_{\text{теор}}$ .

На первом этапе в рамках разработки технологических приёмов повышения качества магнезиальных вяжущих, вырабатываемых из доломитов с пониженным содержанием  $\text{MgCO}_3$ , определяли перспективность использования влияния газовой среды печного пространства в качестве управляющего фактора. Согласно принципа Ле Шателье, температура нагрева и парциальное давление продукта разложения в рабочей камере печи определяют характер протекания реакции термической диссоциации доломита.

Влияние парциального давления диоксида углерода  $P_{\text{CO}_2}^\phi$  на направление химического процесса характеризуется изменением энергии Гиббса. В соответствии с уравнением Вант-Гоффа, имеем

$$\Delta G_T = RT(\ln P_{\text{CO}_2}^\phi - \ln P_{\text{CO}_2}^p), \quad (3)$$

где  $P_{\text{CO}_2}^\phi$  – фактическое парциальное давление  $\text{CO}_2$  в окружающей газовой среде;  $P_{\text{CO}_2}^p$  – расчетная упругость диссоциации  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

Константа равновесия связана с температурой уравнением изотермы Вант Гоффа [3, 4]:

$$\Delta G = -2,3RT \lg K. \quad (4)$$

В свою очередь константа равновесия реакции диссоциации карбоната магния составляет

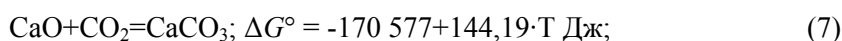
$$K = \frac{A_{\text{MgO}}}{A_{\text{MgCO}_3}} P_{\text{CO}_2}, \quad (5)$$

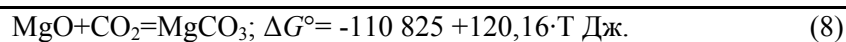
где  $A_{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2}$  и  $A_{\text{MgO}}$  – активность доломита и оксида магния, равная единице для твердых веществ. Согласно уравнению (4), константа равновесия равна

$$\lg K = -\frac{\Delta G^0}{2,3RT}. \quad (6)$$

Упругость диссоциации карбоната магния зависит от температуры, а величина  $P_{\text{CO}_2}^\phi$  является характеристикой печного пространства, в котором осуществляется обжиг горной породы. Реакция идет в сторону разложения карбоната, если  $\Delta G^\circ < 0$ , что реализуется при давлении  $\text{CO}_2$  ниже равновесного  $P_{\text{CO}_2}^\phi < P_{\text{CO}_2}^p$ .

Уравнения температурной зависимости  $\Delta G^\circ$  для реакций образования  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  имеют вид





После подстановки и преобразований зависимость упругости диссоциации от температуры обжига доломита составит [4]

$$\left(\lg P_{\text{CO}_2}\right)_{\text{CaCO}_3} = -8905 / T + 7,53; \quad (9)$$

$$\left(\lg P_{\text{CO}_2}\right)_{\text{MgCO}_3} = -5798 / T + 6,27. \quad (10)$$

Результаты табулирования уравнений при различных температурах приведены в таблице.

Влияние температуры обжига доломита  
на парциальное давление и пороговое содержание  $\text{CO}_2$

Минералы доломита	Показатели ( $P_{\text{CO}_2}$ , Па / $\text{CO}_2$ , %) при температуре обжига, °С				
	500	600	700	800	900
$\text{MgCO}_3$	6093,6/6,1	43881,3/44	210592/210	754470/754	2174446/2174
$\text{CaCO}_3$	10,23/0,01	213,5/0,21	2387,24/2,4	17015,2/17	86767/86,7

Анализ показывает, что на начальных этапах обжига содержание  $\text{CO}_2$  не оказывает влияния на термолит магнетита, но препятствует термическому разложению  $\text{CaCO}_3$ . Избирательному воздействию  $\text{CO}_2$  способствует наличие двуокиси углерода в окружающем воздухе (0,03 %), которое существенно возрастает в процессе обжига за счет порций  $\text{CO}_2$ , выделяющихся из  $\text{MgCO}_3$ . В этих условиях на границе частиц горной породы формируется пассивирующий газовый слой, сохраняющийся до температур 770-800°С. Данные опубликованных ранее работ подтверждают, что начало разложения магнетита происходит при температуре 460 °С, достигая максимальной скорости при 600-650 °С [5].

Для теоретического описания механизма селективного термолитза недостаточно оперировать величиной  $P_{\text{CO}_2}^\phi$ , поскольку присутствуют два различных этапа обжига, взаимоувязанных по температурной шкале. Сначала наступает диффузионный этап, когда выделяющаяся двуокись углерода замедляет скорость реакции путем повышения величины  $P_{\text{CO}_2}$  в приграничных слоях частиц твердой фазы. Далее за счет градиента концентраций происходит постепенная диффузия газообразных продуктов от поверхности, что понижает величину  $P_{\text{CO}_2}$ , и термолит циклически продолжается.

При достижении температуры химического кипения давление углекислого газа достигает  $1 \cdot 10^5$  Па. Вновь образованные объемы газообразной фазы создают положительный градиент давления, интенсифицируя тем самым процесс термолитза, который переходит в кинетический режим. На этом этапе обжига доломита вся подводимая к поверхности тепловая энергия расходуется на ускорение разложения, а реакция становится изотермической.

Таким образом, рассмотренные особенности протекания процессов позволяют обосновать область диффузионного разложения в качестве оптимального температурного диапазона для практической реализации технологии селективного обжига доломита на магниезиальное вяжущее. Однако результаты других авторов показывают, что модель, предполагающая упрощенную интерпретацию термолитза доломита, как результата образования градиентов и диффузионных явлений не обеспечивает сходимость с экспериментальными данными [5, 6, 7]. Уравнение Ленгмюра, определяющее количество молекул, испаряемых с поверхности твердой частицы, имеет вид [5]:

$$I_1 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8RT_q}{\pi M_{\text{CO}_2}}} \frac{P_v}{kT_q}, \quad (11)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_ч$  – температура частицы;  $M_{CO_2}$  – молярная масса  $CO_2$ ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $P_v$  – парциальное давление газовой фазы, определяемое по закону Рауля,

$$P_v = P_0 e^{-\frac{\Delta G(T)}{RT}}, \quad (12)$$

где  $p_0 = 1 \cdot 10^5$  Па;  $\Delta G$  – свободная энергия Гиббса.

Уравнения (11) и (12), основанные на термодинамике процессов и равновесии между испарением и конденсацией, позволяют учесть влияние испаряемости частиц, а также площади их поверхности  $S_{уд}$  и плотности  $\rho$ . Так, количество частиц шарообразной формы при одномодальном заполнении единичного кубического объема равно

$$N = \frac{1}{d^3} = \left( \frac{S_{уд} \cdot \rho}{6} \right)^3. \quad (13)$$

При этих приближениях изменение во времени доли карбоната в частице  $CaMg(CO_3)$  совпадает с термогравиметрией и описывается уравнением вида

$$\frac{\partial_{CaMg(CO_3)}}{\partial \tau} = I_1 \frac{\partial S_{уд}}{\partial t}. \quad (14)$$

Очевидно, реальный процесс сложнее и нуждается в корректировке параметрами, оперирующими объемными явлениями, например энергией активации  $Ea$ , учитывающей наличие промежуточного состояния между реагентами и продуктами в обжигаемой системе. В процессе реакции такой термически активированный комплекс обладает потенциальной энергией, достаточной для повторения цикла выделения  $CO_2$  из кристаллической решетки карбонатов. В этом случае связь между скоростью термолитиза и температурой обжига описывается уравнением Аррениуса

$$k = A \cdot e^{-\frac{Ea}{RT}}, \quad (15)$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $A$  – предэкспоненциальный множитель, отражающий частоту и ориентацию столкновений молекул;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $Ea$  – энергия активации, равная  $Ea_{(MgCO_3)} = 203$  кДж/моль [6].

*Экспериментальная часть.* В качестве исходного сырья использован доломит производства ООО «Иссинский КСМ», имеющий следующий оксидный состав (% по массе):  $CO_2$  – 45,  $CaO$  – 30,  $MgO$  – 20. Эталонном сравнения являлся промышленный магнезиальный цемент, выпускаемый под маркой «МАГцемент».

При проведении опытов использовалась муфельная электрическая печь ПМ-12 объемом 8 л при габаритных размерах рабочей камеры 190×110×350 мм (Ш×В×Г). В экспериментах применяли различные по объему навески, которые испытывали в рыхло-насыпном состоянии (рис. 1). Обжиг проводили с использованием цилиндрических ёмкостей из нержавеющей стали диаметром 90 мм и высотой 30 мм.

В первой серии экспериментов исследовали влияние степени удаления газообразных продуктов термолитиза. Начальная масса каждой навески доломитовой муки составляла 70 г. Обжиг проводили при температуре 810°C с выдержкой 2,5 ч. По окончании выдержки печь отключали, и образцы остывали в ней до комнатной температуры в течение 12 ч. Одну ёмкость обжигали в открытом состоянии, вторую – плотно закрытой стальной пластиной. Потери массы составили: 20,3 % – для открытой ёмкости; 14,6 % – для ёмкости, закрытой пластиной. Активность продуктов обжига, определённая по ГОСТ, соответственно равнялась 25,0 % и 2,6 %. Для полноты исследований был проведен обжиг доломитовой муки в открытой ёмкости при 760°C, который выявил потерю массы 13,4 % и химическую активность 1,2 %. Эти данные были приняты в качестве эталонных, поскольку последующие испытания показали, что

полученное вяжущее имело среднее значение показателя прочности при сжатии (25...30 МПа).

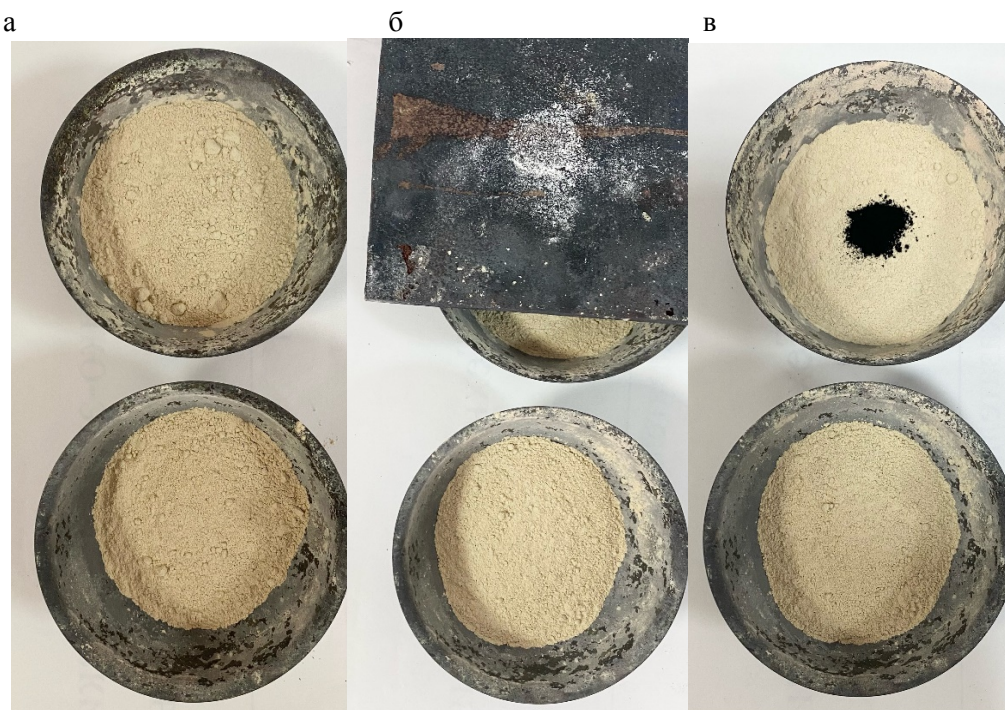


Рис. 1. Образцы навесок доломита (верхний ряд – до обжига, нижний – после): а – открытые емкости; б – пластина для закрытия емкости; в – с добавкой угля

Во второй серии изучали действие добавки дисперсного углерода. Навески массой 100 г обжигали при 760°C в течение 2,5 ч с последующим медленным охлаждением в печи (12 ч). Опытный образец содержал 1 % от массы сырья добавку измельчённого угля, введённого совместным помолом в ножевой мельнице в течение одной минуты. Контрольный образец углеродной добавки не содержал. Потеря массы контрольного образца составила 14,6 %, опытного – 16,6 %. Активность продуктов, определённая по той же методике, составила 3,3 % для контрольного и 4,8 % для опытного образца. Графики потери массы и активности приведены на рис. 2 и 3.

Полученные данные показывают, что повышение температуры обжига и свободное удаление CO<sub>2</sub> приводят к одновременному росту потери массы и активности. Ограничение газообмена с помощью пластины при 810°C резко снижает оба показателя. Введение углеродной добавки при 760°C интенсифицирует разложение, что выражается в увеличении потери массы на 2 % и активности на 1,5 %.

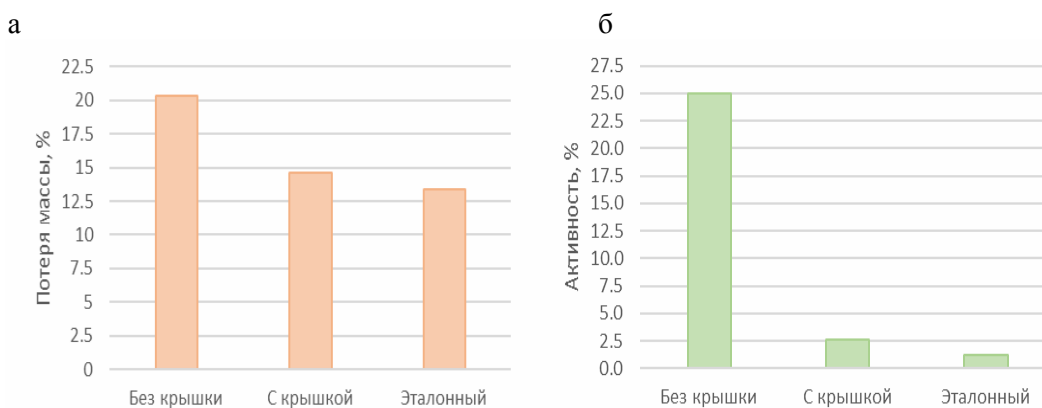


Рис. 2. Влияние CO<sub>2</sub> на гравиметрию (а) и активность (б) при обжиге

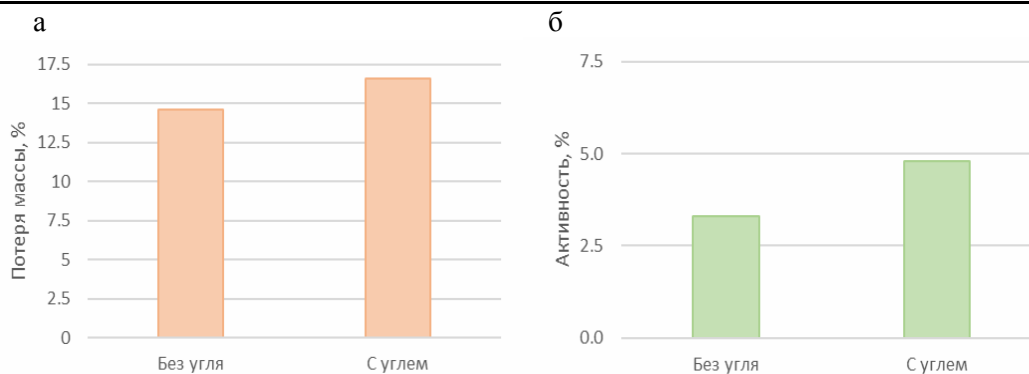


Рис. 3. Влияние добавки угля на гравиметрию (а) и активность (б) при обжиге

Общий вид образцов, полученных из растворов на основе каустического доломита, приведены на рис. 4.



Рис. 4. Контрольные образцы:  
красный цвет – из разработанного каустического доломита;  
белый – из магниального цемента (промышленный эталон)

### Выводы

Таким образом, парциальное давление углекислого газа в печном пространстве является эффективным инструментом управления фазовым составом продукта обжига доломита. Изменяя условия газообмена в рабочей камере, можно добиться селективного разложения магниальной составляющей и получить вяжущее с повышенным содержанием активного MgO даже из сырья с пониженным содержанием карбоната магния. Предложенные технологические приёмы – ограничение отвода газов и введение углеродсодержащих добавок – просты в реализации, не требуют повышения температуры обжига и позволяют вовлекать в производство местные доломиты, ранее считавшиеся малопригодными.

Результаты исследования закладывают физико-химическую основу для направленного проектирования режимов обжига карбонатных пород, а предложенный подход может быть распространён на переработку других видов минерального сырья и техногенных отходов. Дальнейшие работы целесообразно сосредоточить на кинетическом моделировании процессов тепломассопереноса в плотном слое и отработке технологии в условиях, приближенных к промышленным.

### Список литературы

1. Береговой, В.А. Текстиль-бетоны на магниальных вяжущих, армированных натуральными волокнами / В.А. Береговой, А.В. Семилетков, А.С. Присевка // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2025. – № 2(21). – С. 12–20.
2. Береговой, А.М. Энергоэффективные здания и их конструкции с учетом использования местных материалов / А.М. Береговой, В.А. Береговой. – Пенза : ПГУАС, 2006. – 203 с.

- 
3. Падерин, С.Н. Теория расчетов металлургических систем и процессов / С.Н. Падерин, В.В. Филлипов. – Москва : МИСиС, 2002. – 334 с.
  4. Казачков, В.К. Расчеты по теории металлургических процессов / В.К. Казачков. – Москва : Metallurgy, 1985. – 126 с.
  5. Mancarella, F. Kinetics of Thermal Decomposition of Particulate Samples of  $MgCO_3$ : Experiments and Models / F. Mancarella, M. D’Elia, G. Micca Longo, S. Longo, V. Orofino. – DOI: <https://doi.org/10.3390/chemistry4020039> // Chemistry. – 2022. – Vol. 4. – P. 548–559.
  6. Micca Longo, G. Kinetics of White Soft Minerals (WSMs) Decomposition under Conditions of Interest for Astrobiology: A Theoretical and Experimental Study / G. Micca Longo, M. D’Elia, S. Fonti, S. Longo, F. Mancarella, V. Orofino // Geosciences. – 2019. – Vol. 9. – P 101.
  7. Tian, L. An Experimental Study on Thermal Decomposition Behavior of Magnesite / L. Tian, A. Tahmasebi, J. Yu, // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2014. – Vol. 118. – P. 1577–1584.

### References

1. Beregovoy, V.A. Textile concretes based on magnesia binders reinforced with natural fibers / V.A. Beregovoy, A.V. Semiletkov, A.S. Prisevka // Bulletin of the PSUAC: construction, science and education. – 2025. – № 2(21). – P. 12–20.
2. Beregovoy, A.M. Energy-efficient buildings and their designs, taking into account the use of local materials / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy. – Penza : Penza State University of Architecture and Construction, 2006. – 203 p.
3. Paderin, S.N. Theory of calculations of metallurgical systems and processes / S.N. Paderin, V.V. Fillipov. – Moscow : MISIS, 2002. – 334 p.
4. Kazachkov, V.K. Calculations on the theory of metallurgical processes / V.K. Kazachkov. – Moscow : Metallurgy, 1985. – 126 p.
5. Mancarella, F. Kinetics of Thermal Decomposition of Particulate Samples of  $MgCO_3$ : Experiments and Models / F. Mancarella, M. D’Elia, G. Micca Longo, S. Longo, V. Orofino. – DOI: <https://doi.org/10.3390/chemistry4020039> // Chemistry. – 2022. – Vol. 4. – P. 548–559.
6. Micca Longo, G. Kinetics of White Soft Minerals (WSMs) Decomposition under Conditions of Interest for Astrobiology: A Theoretical and Experimental Study / G. Micca Longo, M. D’Elia, S. Fonti, S. Longo, F. Mancarella, V. Orofino // Geosciences. – 2019. – Vol. 9. – P 101.
7. Tian, L. An Experimental Study on Thermal Decomposition Behavior of Magnesite / L. Tian, A. Tahmasebi, J. Yu, // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2014. – Vol. 118. – P. 1577–1584.

*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

**Коровкин Марк Олимпиевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: m\_korovkin@mai.ru

**Ерошкина Надежда Александровна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: n\_eroshkina@mail.ru

**Шестернин Александр Игоревич,**  
аспирант кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: bodroff.ilya2017@yandex.ru

**Бодров Илья Дмитриевич,**  
аспирант кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: bodroff.ilya2017@yandex.ru

**Глебова Татьяна Викторовна,**  
магистрант  
E-mail: glebovatv1602@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

**Korovkin Mark Olympievich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Building Materials and  
Woodworking Technology»  
E-mail: m\_korovkin@mai.ru

**Eroshkina Nadezhda Aleksandrovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Building Materials and  
Woodworking Technology»  
E-mail: n\_eroshkina@mail.ru

**Shesternin Alexander Igorevich,**  
Postgraduate student of the department «Building  
Materials and Woodworking Technology»  
E-mail: psm31@mail.ru

**Bodrov Ilya Dmitrievich,**  
Postgraduate student of the department «Building  
Materials and Woodworking Technology»  
E-mail: bodroff.ilya2017@yandex.ru

**Glebova Tatiana Viktorovna,**  
master-student  
E-mail: glebovatv1602@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.И. Шестернин, И.Д. Бодров, Т.В. Глебова

В работе в качестве рецептурных факторов, оказывающих влияние на свойства, определяющие долговечность самоуплотняющегося мелкозернистого бетона, исследованы активные (микрокремнезём, метаксаолин) и инертная (кварцевая мука) минеральные добавки, стальная фибра. Установлено, что при введении 6 % микрокремнезема достигаются наибольшее повышение прочности и снижение усадки. Показано, что стальная фибра в дозировке 1,4 % повышает прочность при изгибе в 1,7 раза и снижает усадку на 58 %. Предлагается использовать в составе самоуплотняющегося мелкозернистого бетона активную и инертную минеральные добавки, стальную микрофибру, что значительно повышает характеристики, влияющие на долговечность бетона.

*Ключевые слова: самоуплотняющийся мелкозернистый бетон, микрокремнезем, метаксаолин, кварцевая мука, прочность, усадка, долговечность*

## INFLUENCE OF FORMULATION FACTORS ON THE PROPERTIES THAT DETERMINE THE DURABILITY OF SELF-COMPACTING FINE-GRAIN CONCRETE

M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, A.I. Shesternin, I.D. Bodrov, T.V. Glebova

In the work, active (microsilica, metakaolin) and inert (silica fume) mineral additives, as well as steel fibers, were studied as factors affecting the properties that determine the durability of self-compacting fine-grained concrete. It was found that the introduction of 6 % microsilica resulted in the

---

greatest increase in strength and reduction in shrinkage. It was also shown that the addition of 1.4 % steel fibers increased the flexural strength by 1.7 times and reduced the shrinkage by 58 %. It is proposed to use active and inert mineral additives, as well as steel microfibre, in self-compacting fine-grained concrete, which significantly improves the durability characteristics of concrete.

*Keywords: self-compacting fine-grained concrete, microsilica, metakaolin, quartz flour, strength, shrinkage, durability*

### **Введение**

Самоуплотняющийся бетон (СУБ) представляет собой разновидность высокоподвижной бетонной смеси, которая способна растекаться и уплотняться под действием собственного веса без применения вибрации, полностью заполняя опалубку, обтекая арматурный каркас. Такое реологическое поведение достигается за счёт трёх основных приёмов: повышенного содержания тонкодисперсных частиц (цемента и микронаполнителей), использования высокоэффективных суперпластификаторов, а также, при необходимости, введения стабилизаторов вязкости, предотвращающих расслоение [1]. Благодаря этим свойствам СУБ применяется в густоармированных монолитных конструкциях, тонкостенных элементах, архитектурных формах сложной геометрии, а также в конструкциях с повышенными требованиями к качеству поверхности.

Вместе с тем, наряду с технологическими преимуществами, самоуплотняющемуся бетону присущи и определённые недостатки, способные снизить его долговечность. К числу наиболее значимых недостатков относятся повышенный риск расслоения и водоотделения высокоподвижных смесей, относительно высокая усадка (особенно в ранние сроки твердения), а также чувствительность к колебаниям влажности компонентов смеси [2, 3]. Эти факторы могут вызывать образование микротрещин, увеличивать проницаемость и, как следствие, снижать морозостойкость и сопротивление агрессивным средам.

Для устранения перечисленных недостатков и обеспечения требуемой долговечности конструкций из СУБ в настоящее время используют три основных подхода, реализуемых на стадии подбора состава. Первый подход заключается в использовании активных и инертных минеральных добавок. Активные добавки (микрокремнезём, метакаолин), обладающие пуццолановой активностью, связывают гидроксид кальция с образованием дополнительных гидросиликатов кальция, уплотняют микроструктуру цементного камня и снижают его проницаемость. Инертные наполнители (кварцевая мука, известняковый порошок) не вступают в химические реакции, но улучшают плотность упаковки частиц, уменьшают объём капиллярных пор и способствуют повышению удобоукладываемости [4–6]. Кроме этого в состав бетона могут вводиться добавки, уплотняющие структуру цементного камня [7]. Второй подход основан на дисперсном армировании бетона фиброй – стальной или неметаллической. Волокна, распределённые в объёме бетона, перераспределяют растягивающие напряжения, препятствуют развитию трещин на ранних стадиях и повышают ударную вязкость бетона [8, 9]. Третий подход связан с оптимизацией плотности упаковки твёрдых частиц – заполнителей, цемента, тонкодисперсных добавок. Согласно существующим теориям, при максимальной плотности упаковки частиц обеспечивается снижение расхода вяжущего и воды без потери подвижности, что уменьшает пористость и повышает долговечность бетона [10, 11].

Цель работы – установить влияние рецептурных факторов – активных и инертных минеральных добавок, стальной фибры – на показатели долговечности самоуплотняющегося бетона: прочность при сжатии и изгибе и усадку.

### **Материалы и методы исследования**

В работе использовались следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I 52,5 (ОАО «Азия Цемент»); кварцевый песок Сурского месторождения с модулем крупности  $M_k=1,5$ ; активные минеральные добавки – микрокремнезём марки МК-85 (ПАО «НЛМК») и метакаолин марки ВМК-45 (ООО «Синерго»); инертная минеральная добавка – микрокварц (ОАО «Люберецкий ГОК», Московская обл.) с удельной поверхностью 300 см<sup>2</sup>/кг; суперпластифицирующая добавка на основе поликарбоксила-

тов SikaViscocrete 240 HE; стальная латунированная волновая фибра длиной 15 мм и диаметром 0,3 мм.

Влияние активных минеральных добавок изучали при дозировках: микрокремнезём – 3, 6 и 9 % от объёма цемента; метакаолин – 1,8; 3,6 и 5,4 % от объёма цемента. Составы приведены в табл. 1. Постоянными оставались общее количество вяжущего (цемент и добавка) и водоцементное отношение.

Т а б л и ц а 1

Составы самоуплотняющегося мелкозернистого бетона с различной долей замещения цемента минеральными добавками

Обозначение состава	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Добавка, % от объёма цемента	0	3	6	9	1,8	3,6	5,4
Наименование материала	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>						
Цемент	870	844	817	792	854	839	823
Микрокремнезём	-	18,9	37,8	56,7	-	-	-
Метакаолин	-	-	-	-	12,2	25,6	37,8
Песок	1045	1044	1044	1044	1045	1044	1045
СП240HE	17,4	17,3	17,3	17,3	17,4	17,4	17,4
Вода	305	305	305	305	305	305	305

В составах СУБ с фиброй в качестве инертного наполнителя использовали микрокварц. Содержание стальной фибры составляло 0,7 и 1,4 % от объёма бетонной смеси (53 и 106 кг/м<sup>3</sup> соответственно). В/Ц во всех составах бетона было равным 0,41. Составы бетона с фиброй приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Составы самоуплотняющегося мелкозернистого бетона с различным содержанием фибры

Материал	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>		
	№ 8	№ 9	№ 10
Цемент	603	599	595
Песок	1114	1106	1099
Кварцевая мука	278	276	274
МК	47	46	46
СП240HE	7,6	7,5	7,5
Вода	249	247	246
Фибра	0	53	106
В/Ц	0,41	0,41	0,41

Для приготовления бетонной смеси сначала перемешивали между собой цемент и минеральные добавки. Смесь сухих компонентов вяжущего постепенно вводилась в воду с суперпластификатором и перемешивалась до однородного состояния. В полученное тесто добавлялся песок, и смесь еще раз перемешивалась. На последнем этапе в растворную смесь вводилась микрофибра. После перемешивания определяли расплыв бетонной смеси из конуса Хегермана (форма-конус по ГОСТ 310.4).

Для исследования прочностных свойств и усадки мелкозернистого самоуплотняющегося бетона изготавливали образцы-призмы размерами 40×40×160 мм. Твердение проходило в нормальных условиях (температура (20±2) °С, относительная влажность (95±5) %) в течение 28 суток. Прочность на сжатие и изгиб определяли в возрасте 3, 7 и 28 сут для составов с минеральными добавками, а для составов с фиброй дополнительно – через 1, 2 и 150 сут.

Усадка определялась на образцах-призмах, твердевших 28 сут в нормальных условиях. Для определения усадки образцы хранились в лабораторных условиях ((20±2) °С,

55–65 % влажности) в течение 90 и 150 сут и через 1, 3, 7 сут, а затем 1 раз в неделю подвергались испытаниям.

### Результаты и их обсуждение

На первом этапе изучали влияние активных минеральных добавок на удобоукладываемость бетонной смеси. На рис. 1 представлена зависимость распыла смеси из конуса Хеггермана от дозировки микрокремнезема и метакаолина.

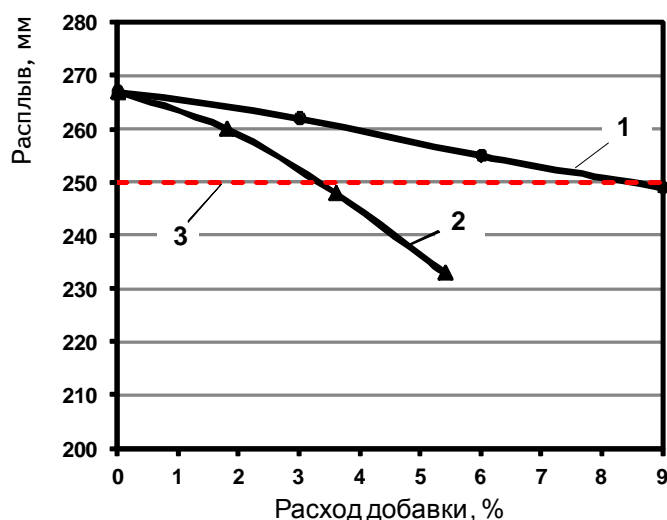


Рис. 1. Влияние содержания минеральных добавок на распыл конуса Хеггермана бетонной смеси:  
1 – микрокремнезем; 2 – метакаолин; 3 – нижняя граница распыла для самоуплотняющейся бетонной смеси

Для контрольного состава бетона (состав без добавки) распыл составил 267 мм, что превышает нижнюю границу распыла самоуплотняющихся бетонных смесей из конуса Хеггермана (250 мм). Введение микрокремнезёма приводит к равномерному снижению распыла с ростом его дозировки. Аналогичная тенденция наблюдается и для метакаолина, однако в этом случае падение подвижности выражено сильнее. Такое различие объясняется тем, что микрокремнезём и метакаолин характеризуются высокой удельной поверхностью (для микрокремнезёма она составляет 15–25 тыс. см<sup>2</sup>/г, для метакаолина – 10–20 тыс. см<sup>2</sup>/г). Чем выше удельная поверхность частиц, тем больше воды требуется для их смачивания. При одинаковом водоцементном отношении введение тонкодисперсных добавок приводит к тому, что часть воды расходуется на образование оболочек вокруг этих частиц. В результате уменьшается объём свободной воды, которая непосредственно отвечает за подвижность бетонной смеси [4, 5]. Поэтому в связи с ростом дозировки добавки распыл конуса закономерно снижается. Составы с содержанием микрокремнезёма до 6 % включительно, а также с метакаолином 1,8 % сохраняют распыл на уровне не ниже 250 мм, что позволяет относить их к самоуплотняющимся. При больших дозировках (9 % микрокремнезёма, 3,6 % и 5,4 % метакаолина) распыл снижается ниже 250 мм, что свидетельствует о недостаточной подвижности смеси.

Более сильное негативное влияние метакаолина на удобоукладываемость по сравнению с микрокремнезёмом связано не только с его высокой удельной поверхностью, но и с формой частиц (пластинчатая у метакаолина в отличие от сферической у микрокремнезёма), что увеличивает внутреннее трение и снижает растекаемость [6]. Кроме того, метакаолин более интенсивно адсорбирует суперпластификатор, что требует его повышенного расхода для достижения той же подвижности. Таким образом, для сохранения требуемой удобоукладываемости дозировка метакаолина не должна превышать 1,8 % от объёма цемента, тогда как микрокремнезём можно вводить до 6 % без существенной потери текучести.

Влияние микрокремнезёма на прочность бетона при сжатии показано на рис. 2. В ранние сроки твердения (3 и 7 сут) введение микрокремнезёма приводит к небольшому снижению прочности по сравнению с контрольным составом. Это объясняется тем, что добавка замещает часть цемента, а её собственная пуццолановая активность в первые дни проявляется слабо, так как реакция микрокремнезёма с гидроксидом кальция требует времени и начинается в заметной степени после 7 суток твердения [5]. Кроме того, разбавление цемента тонкодисперсными частицами уменьшает количество клинкерной фазы, отвечающей за раннюю прочность. В более поздние сроки (28 сут) наблюдается рост прочности с увеличением дозировки добавки. Это обусловлено двумя факторами: микронаполнением (заполнение пустот между частицами цемента) и пуццолановой реакцией, связывающей гидроксид кальция с образованием дополнительных гидросиликатов кальция, что уплотняет микроструктуру цементного камня [5, 6]. Оптимальной по соотношению «прирост прочности / расход добавки» является дозировка 6 %: в возрасте 28 сут прочность достигает 99 МПа, что на 7 МПа (или примерно 8 %) выше контрольного значения (92 МПа). Дальнейшее повышение содержания микрокремнезёма до 9 % также повышает прочность (102 МПа), однако при такой дозировке наблюдаются значительное снижение удобоукладываемости (расплыв падает ниже 250 мм, как показано на рис. 1), увеличение усадки (при 9 % усадка выше, чем при 6 %, см. рис. 4), а также риск неполной гидратации частиц и их агломерации, что в дальнейшем может ухудшить однородность структуры [6]. Поэтому для практического применения рекомендуется ограничиваться дозировкой 6 % от объёма цемента.

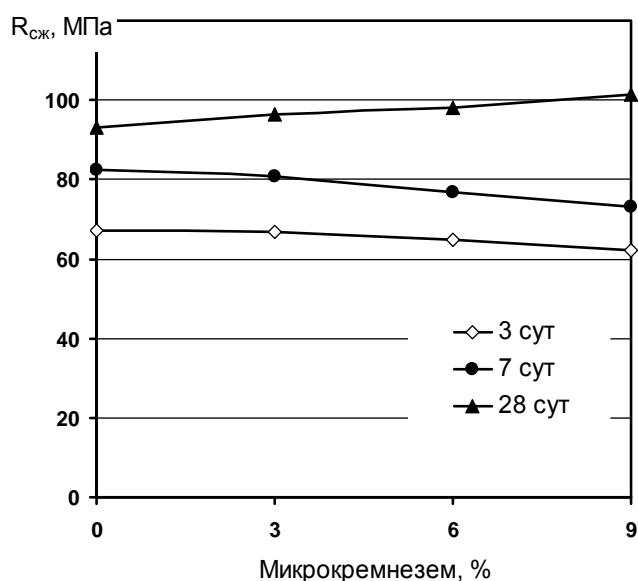


Рис. 2. Влияние содержания микрокремнезема на прочность бетона на сжатие

В отличие от микрокремнезёма, метакаолин (рис. 3) в возрасте 3 сут снижает прочность из-за меньшей начальной реакционной способности и разбавления цемента [6]. Эффект добавки начинает проявляться в более позднем возрасте – через 7 и 28 суток. Рост прочности происходит с увеличением дозировки добавки до 3,6 %, обеспечивая прочность на 7-е сутки 78 МПа, а на 28-е сутки – 98 МПа. Дальнейшее увеличение содержания метакаолина до 5,4 % приводит к снижению прочности, удобоукладываемости и повышению усадки (рис. 5) из-за агломерации негидратированных частиц [6], что объясняется избытком невступившего в реакцию метакаолина, который не только не упрочняет структуру, но и создаёт микродефекты, увеличивая пористость и ослабляя контактную зону. Таким образом, оптимальная дозировка метакаолина – 3,6 % от объёма цемента.

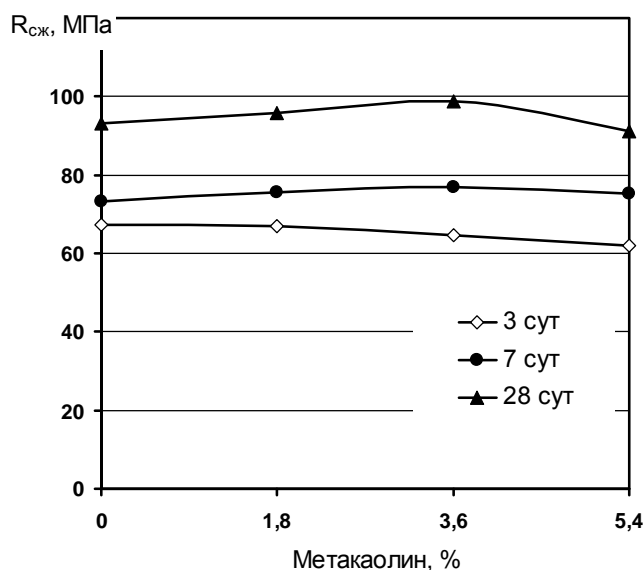


Рис. 3. Влияние содержания метакаолина на прочность бетона на сжатие

Усадочные деформации (см. рис. 4 и 5) снижаются при введении добавок микрокремнезема и метакаолина. Наибольший эффект для микрокремнезёма достигается при дозировке 6 %: усадка через 150 сут уменьшается в 1,9 раза (с 0,63 до 0,34 мм/м). Для метакаолина максимальное снижение усадки (в 1,7 раза) наблюдается при дозировке 5,4 %. Такое значительное снижение усадки объясняется уплотнением микроструктуры за счёт пуццолановой реакции: образующиеся дополнительные гидросиликаты кальция заполняют капиллярные поры, что приводит к уменьшению испарения влаги и препятствует усадочным деформациям [4]. При этом микрокремнезём более эффективен из-за более высокой пуццолановой активности и оптимального размера частиц, что позволяет ему плотнее заполнять межзёрновые пустоты и создавать более однородную, малопористую структуру цементного камня.

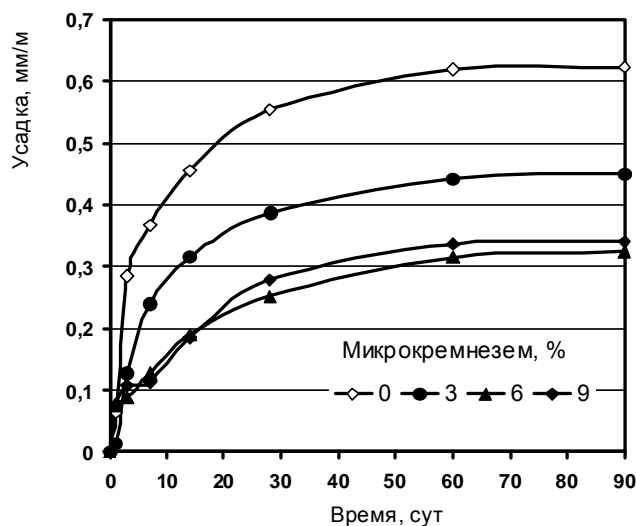


Рис. 4. Кинетика усадки бетона с добавкой микрокремнезема

Во второй серии экспериментов исследовали влияние стальной фибры на свойства самоуплотняющегося бетона. Составы с фиброй содержали инертный наполнитель – кварцевую муку – для обеспечения плотной упаковки частиц (см. табл.2).

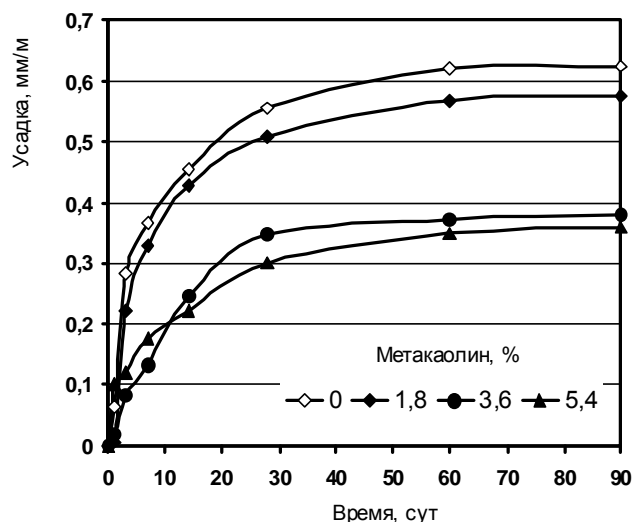


Рис. 5. Кинетика усадки бетона с добавкой метакаолина

На рис. 6 показано, что введение фибры снижает расплыв конуса, однако все значения остаются в пределах, допустимых для самоуплотняющихся смесей ( $\geq 250$  мм). Уменьшение подвижности объясняется повышением внутреннего трения между фиброй и твёрдой фазой [8].

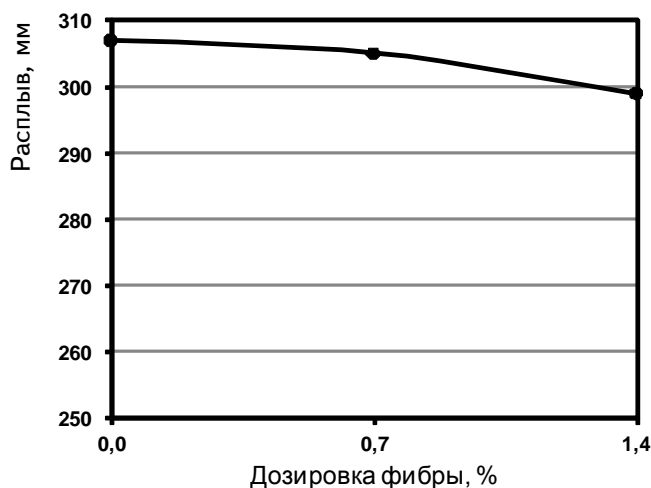


Рис. 6. Влияние дозировки фибры на расплыв конуса бетонной смеси

Прочность при сжатии (рис. 7) с ростом содержания фибры незначительно повышается: в начальные сроки твердения – на 8 и 10 % и в поздние сроки – на 15 и 19 %. Прочность при изгибе (рис. 8) возрастает примерно в 1,7 раза при дозировке 1,4 % фибры. Этот эффект обусловлен тем, что стальные волокна воспринимают растягивающие напряжения, перераспределяют нагрузку и препятствуют развитию трещин [9]. В возрасте 150 сут наблюдается дополнительный рост прочности на изгиб за счёт улучшения сцепления фибры с цементным камнем.

Усадочные деформации (рис. 9) снижаются при введении фибры. Через 146 сут усадка состава без фибры составляет 0,62 мм/м. Добавление 0,7 % фибры уменьшает усадку до 0,435 мм/м (на 30 %), а 1,4 % – до 0,26 мм/м (на 58 %). Механизм снижения усадки заключается в том, что волокна, равномерно распределённые в объёме бетона, воспринимают часть растягивающих напряжений, возникающих при усадке, выполняя функцию распределённого армирования. В результате часть усадочных деформаций компенсируется за счёт работы волокон, что приводит к снижению суммарной усадки материала.

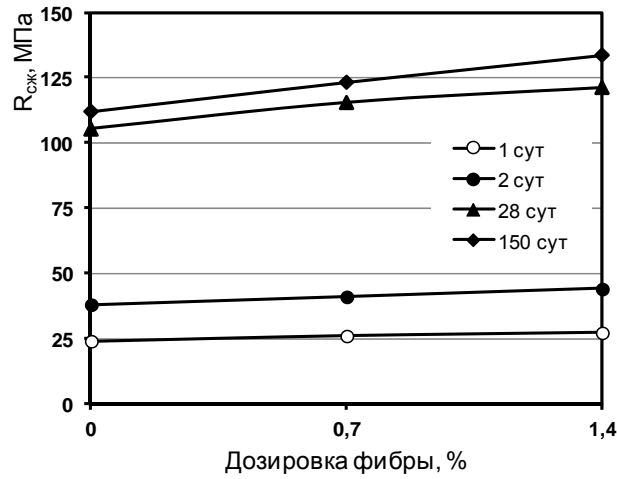


Рис.7. Влияние дозировки фибры на прочность при сжатии самоуплотняющегося бетона в различные сроки твердения

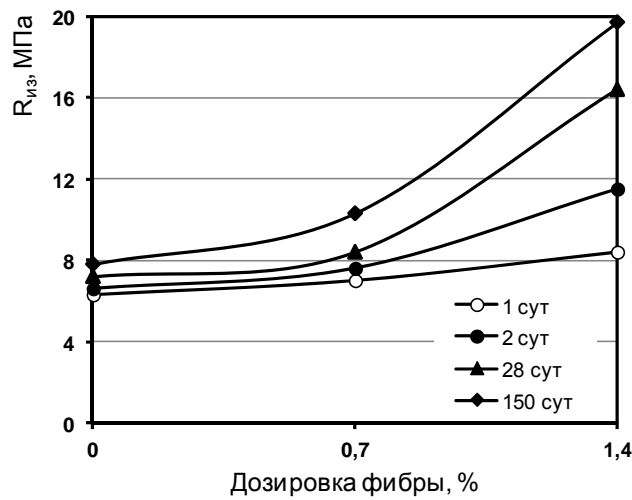


Рис.8. Влияние дозировки фибры на прочность при изгибе самоуплотняющегося бетона в различные сроки твердения

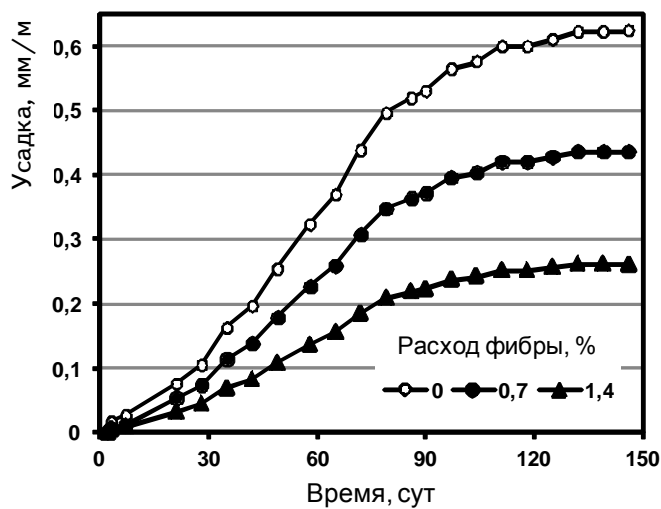


Рис.9. Влияние дозировки фибры на усадку самоуплотняющегося бетона

## Выводы

1. Введение микрокремнезёма в количестве 6 % от объёма цемента обеспечивает наилучшее сочетание прочности (99 МПа через 28 сут) и снижения усадки (в 1,9 раза). Дозировка 9 % не рекомендуется из-за ухудшения удобоукладываемости и возможной агломерации.

2. Оптимальная дозировка метаксаолина составляет 1,8 % от объёма цемента. При этом прочность через 28 сут достигает 98 МПа, усадка снижается в 1,7 раза. Дальнейшее увеличение содержания метаксаолина может привести к падению прочности и долговечности.

3. Метаксаолин сильнее снижает распыл бетонной смеси, чем микрокремнезём, что требует корректировки расхода суперпластификатора при его использовании.

4. Введение стальной фибры в количестве 1,4 % от объёма смеси в сочетании с кварцевой мукой повышает прочность при изгибе в 1,7 раза и снижает усадку на 58 % при незначительном уменьшении текучести смеси.

## Список литературы

1. Okamura, H. Self-compacting concrete / H. Okamura, M. Ouchi // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2003. – Vol. 1, No. 1. – P. 5–15.

2. Dey, S. State of art review on self-compacting concrete using mineral admixtures / S. Dey, V.V. Praveen Kumar, K.R. Goud, S.K.J. Basha // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. – 2021. – Vol. 6, No. 1. – P. 1–23.

3. Brouwers, H.J.H. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study / H.J.H. Brouwers, H.J. Radix // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Vol. 35. – P. 2116–2136.

4. Кононова, О.В. Исследование особенностей формирования прочности квазисамоуплотняющегося бетона с микрокремнеземом / О.В. Кононова, А.О. Смирнов // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 9–2. – С. 327–331.

5. Venkatesh, C. Effect of mineral admixtures and curing regimes on properties of self-compacting concrete / C. Venkatesh, M.V.S. Rao, M.P. Kumar, Sonali Sri Durga // *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*. – 2024. – 9(1). – P.25–35.

6. Смирнов, А.О. Комплексное влияние добавок поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма на свойства самоуплотняющихся бетонов / А.О. Смирнов, Л.М. Добшиц, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов // *Вестник ПГТУ. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. – 2024. – № 2. – С. 6–16.

7. Коровкин, М.О. Влияние химических добавок на водопоглощение самоуплотняющегося бетона, изготовленного с применением вторичного заполнителя / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.Ю. Егоров // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. – 2023. – № 1(16). – С. 47–52.

8. Akhmetov, D. Effect of microdispersed and volumetric fiber reinforcement on the strength and durability of self-compacting concrete / D. Akhmetov, A. Urumbaeva, E. Tkach, G. Sarsenova // *Architecture and Civil Engineering*. – 2024. – 1(4). P. 20–26.

9. Чуньхуэй, Ч. Инженерное применение самоуплотняющегося фибробетона: обзор / Ч. Чуньхуэй, И.П. Павлова // *Вестник БрГТУ*. – 2025. – С.15–20.

10. Su, N. A simple mix design method for self-compacting concrete / N. Su, K.-C. Hsu, H.-W. Chai // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Vol. 31. – P. 1799–1807.

11. Zhao, H. Effectiveness of fine aggregate particle size distribution on the properties and the sustainable of self-consolidating concrete / H. Zhao, W. Sun, C. Jin, X. Wu, B. Gao. – DOI:10.1016/j.pce.2025.104024 // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2025. – Vol. 140.

## References

1. Okamura, H. Self-compacting concrete / H. Okamura, M. Ouchi // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2003. – Vol. 1, No. 1. – P. 5–15.

- 
2. Dey, S. State of art review on self-compacting concrete using mineral admixtures / S. Dey, V.V. Praveen Kumar, K.R. Goud, S.K.J. Basha // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. – 2021. – Vol. 6, No. 1. – P. 1–23.
  3. Brouwers, H.J.H. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study / H.J.H. Brouwers, H.J. Radix // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Vol. 35. – P. 2116–2136.
  4. Chunhui, Ch. Engineering application of self-compacting fiber-reinforced concrete: review / Ch. Chunhui, I.P. Pavlova // *Bulletin of BrSTU*. – 2025. – P. 15–20.
  5. Venkatesh, C. Effect of mineral admixtures and curing regimes on properties of self-compacting concrete / C. Venkatesh, M.V.S. Rao, M.P. Kumar, Sonali Sri Durga // *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*. – 2024. – 9(1). – P.25–35.
  6. Smirnov, A.O. Complex influence of polycarboxylate superplasticizer and microsilica additives on the properties of self-compacting concrete / A.O. Smirnov, L.M. Dobshits, S.N. Anisimov, A.Yu. Leshkanov // *Bulletin of PSTU. Series «Materials. Designs. Technologies»*. – 2024. – No. 2. – P. 6–16.
  7. Korovkin, M.O. Effect of chemical admixtures on water absorption of self-compacting concrete made with recycled aggregate / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, A.Yu. Egorov // *PGUAS Bulletin: construction, science and education*. – 2023. – No. 1(16). – C. 47–52.
  8. Akhmetov, D. Effect of microdispersed and volumetric fiber reinforcement on the strength and durability of self-compacting concrete / D. Akhmetov, A. Urumbaeva, E. Tkach, G. Sarsenova // *Architecture and Civil Engineering*. – 2024. – 1(4). P. 20–26.
  9. Chunhui, C. Engineering application of self-compacting fiber-reinforced concrete: a review / Ch. Chunhui, I.P. Pavlova // *Bulletin of BrSTU*. – 2025. – P.15–20.
  - 10 Su, N. A simple mix design method for self-compacting concrete / N. Su, K.-C. Hsu, H.-W. Chai // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Vol. 31. – P. 1799–1807.
  11. Zhao, H. Effectiveness of fine aggregate particle size distribution on the properties and the sustainable of self-consolidating concrete / H. Zhao, W. Sun, C. Jin, X. Wu, B. Gao. – DOI:10.1016/j.pce.2025.104024 // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2025. – Vol. 140.

*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

**Коровкин Марк Олимпиевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: m\_korovkin@mai.ru

**Ерошкина Надежда Александровна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: n\_eroshkina@mail.ru

**Михайлова Елизавета Дмитриевна,**  
студент  
E-mail: em0164782@gmail.com

**Довгуль Елена Юрьевна,**  
студент  
E-mail: lkassiopeya@mail.ru

**Журавлев Сергей Игоревич,**  
студент  
E-mail: sergey.zhuravl228@gmail.com

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Korovkin Mark Olympievich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Building Materials and  
Woodworking Technology»  
E-mail: m\_korovkin@mai.ru

**Eroshkina Nadezhda Aleksandrovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Building Materials and  
Woodworking Technology»  
E-mail: n\_eroshkina@mail.ru

**Mikhailova Elizaveta Dmitrievna,**  
Student  
E-mail: em0164782@gmail.com

**Dovgul Elena Yurievna,**  
Student  
E-mail: lkassiopeya@mail.ru

**Zhuravlev Sergey Igorevich,**  
Student  
E-mail: sergey.zhuravl228@gmail.com

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОДБОРА ПИГМЕНТОВ В СОСТАВЕ ЦВЕТНОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, Е.Д. Михайлова, Е.Ю. Довгуль, С.И. Журавлев

Разработана методика для подбора состава пигментов в мелкозернистом бетоне на белом цементе. Исследована серия из 51 образца с 9 видами пигментов, использованных как по отдельности, так и в смесях из двух компонентов. Дозировка пигментов составляла от 0,5 до 2,0 % от массы вяжущего. Измерение цветовых координат выполнялось с использованием планшетного сканера с последующим преобразованием HSB в CIELAB. На основе полученных данных методом множественной линейной регрессии построены зависимости цветовых координат от концентраций пигментов. Решена обратная задача – расчёт концентраций пигментов для достижения заданного цвета. Получены аналитические зависимости, позволяющие автоматизировать подбор рецептуры. Разработанный метод сокращает время подбора пигментов для получения заданного цвета бетона.

*Ключевые слова: цветной бетон, белый цемент, минеральные пигменты, CIELAB, HSB, колориметрия, регрессионная модель, обратная задача*

## DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR SELECTING PIGMENTS IN COLORED FINE-GRAIN CONCRETE

M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, E.D. Mikhailova, E.Yu. Dovgul, S.I. Zhuravlev

A method has been developed for selecting the composition of pigments in fine-grained concrete based on white cement. The study examined a series of 51 samples with 9 types of pigments, which were used both individually and in mixtures of two components. The dosage of pigments ranged from 0.5 % to 2.0 % of the binder weight. The color coordinates were measured using a tablet scanner and then converted from HSB to CIELAB. Based on the obtained data, the dependencies of color coordinates on pigment concentrations were constructed using multiple linear regression. The inverse problem of calculating pigment concentrations to achieve a given color was solved. Analytical

dependencies were obtained, allowing for the automation of recipe selection. The developed method reduces the time required to select pigments to achieve a given concrete color.

*Keywords: colored concrete, white cement, mineral pigments, CIELAB, HSB, colorimetry, regression model, inverse problem*

### Введение

В современной архитектуре и промышленном дизайне цвет стал полноценным инструментом формирования облика зданий и управления визуальным восприятием [1, 2]. Способность бетона сохранять заданный оттенок без изменений становится ключевым показателем качества для фасадов, элементов благоустройства и интерьеров [3, 4].

Особое место занимает объёмно окрашенный бетон. В отличие от простого окрашивания поверхности, такой бетон сохраняет свой цвет даже при истирании и не требует периодического обновления. Технологически это достигается добавлением минеральных пигментов в вяжущее на этапе приготовления смеси [5].

Современные цифровые технологии позволяют архитектору задавать цвет не в виде приблизительных словесных характеристик, а в виде точных числовых координат в стандартизированных цветовых пространствах. Наиболее распространено в строительстве пространство CIELAB ( $L^*a^*b^*$ ), рекомендованное Международной комиссией по освещению [6]. Главное свойство этого пространства – равномерность восприятия цвета: евклидово расстояние между двумя цветами ( $\Delta E_{ab}^*$ ) примерно соответствует тому, насколько сильно эти цвета различаются для человеческого глаза [7]. Таким образом, задание от архитектора может быть сформулировано как вектор целевых координат ( $L_t^*, a_t^*, b_t^*$ ) с допустимым отклонением  $\Delta E \leq 3$ .

Задача технолога заключается в определении номенклатуры пигментов и их концентраций, обеспечивающих попадание фактического цвета готового изделия в заданную  $\Delta E$ -окрестность целевого цвета.

На практике для подбора пигментов чаще всего используют эмпирический метод. Технолог изготавливает серию пробных образцов с варьируемыми видами и концентрациями пигментов, выдерживает их в течение 28 суток (нормативный срок твердения бетона), выполняет измерение цвета и на основе полученных данных корректирует состав.

При необходимости выполнения трёх-пяти последовательных уточнений состава (типичная ситуация для многокомпонентных пигментных систем) общая продолжительность разработки может достигать нескольких недель или месяцев.

В отличие от систем, где цвет подчиняется простому правилу сложения (например при наложении светофильтров), цвет бетона с двумя и более пигментами нельзя получить простым суммированием цветовых характеристик каждого пигмента. Это объясняется сложными оптическими процессами в неоднородной структуре материала: свет многократно рассеивается на частицах цементного камня и пигментов, а разные пигменты поглощают лучи с разной длиной волны [8, 9]. Это обстоятельство делает эмпирический поиск в многомерном пространстве концентраций чрезвычайно трудоёмким. К указанным проблемам добавляется невозможность заранее определить, можно ли вообще получить нужный оттенок с использованием доступного набора пигментов. Технолог получает такую информацию только после изготовления и измерения всей серии образцов. При этом начальный выбор пигментов и диапазона их концентраций зачастую делается на глаз, что приводит к разным результатам у разных специалистов.

Цель настоящей работы – разработка математической модели, устанавливающей количественную связь между концентрациями пигментов и цветовыми координатами  $L^*a^*b^*$  мелкозернистого бетона на белом цементе. На основе модели предполагается создать метод подбора рецептуры для достижения заданного цвета.

## Методы и материалы для исследования

Исследования проводились на мелкозернистом бетоне, состоящем из белого портландцемента и кварцевой муки, взятых в соотношении 2:1 (13,0 г и 6,5 г соответственно). Водоцементное отношение составляло 0,36, отношение песка к смешанному вяжущему – 1:1. В смесь вводилось 1,1 % поликарбоксилатного суперпластификатора от массы вяжущего. Дозировка пигментов составляла от 0,5 до 2,0 % от массы вяжущего (цемент + кварцевая мука). Для чёрного пигмента дополнительно приготовлен образец с концентрацией 4,0 %.

Для получения смесей использовались следующие материалы:

– портландцемент белый без добавок 1-го сорта ПЦБ 1-500-Д0 производства ООО «Цемикс»;

– молотый пылевидный кварц (кварцевая мука) марки Б;

– сурский кварцевый мытый песок фракции 0,1–0,63 мм, модуль крупности 1,8;

– суперпластификатор «Гиппласт термо Тип 1».

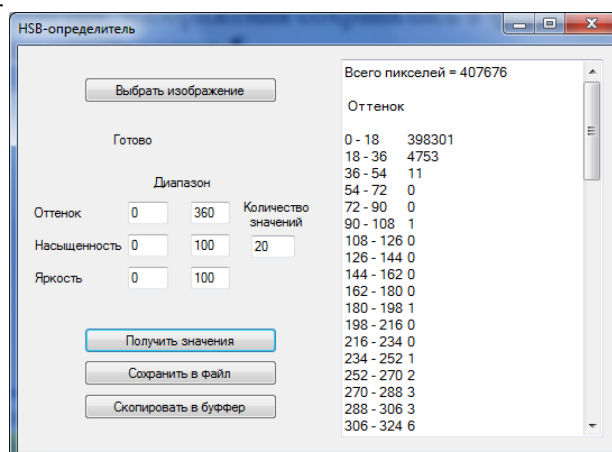
В эксперименте использовалось 9 видов минеральных пигментов: 1 – красный ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 2 – синий (ультрамарин), 3 – жёлтый ( $\text{FeOOH}$ ), 4 – зелёный ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), 5 – оранжевый ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeOOH}$ ), 6 – кадмий красный средний ( $\text{CdS/CdSe}$ ), 7 – белый ( $\text{TiO}_2$ ), 8 – чёрный ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и 9 – кадмий жёлтый ( $\text{CdS}$ ).

Для приготовления образцов сначала в сухом виде перемешивали между собой цемент, кварцевую муку, пигмент и песок. Полученный порошок постепенно вводился в воду затворения с растворённым суперпластификатором. Порошок с жидкостью затворения перемешивался до однородного состояния, а затем смесь заливалась в пластиковые контейнеры. Твердение образцов проходило в камере нормального твердения (температура  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ , относительная влажность  $(95 \pm 5) \%$ ) в течение 28 суток.

Была изготовлена серия из 51 образца, включающая 27 образцов с одним видом пигмента при 3-х дозировках (0,5, 1,0 и 2 %), 1 образец с чёрным пигментом в дозировке 4,0 % и 23 образца с двумя пигментами (различные комбинации пар пигментов с соотношением 0,7 %/1,3 % и 1,3 %/0,7 %).

После завершения твердения поверхность каждого образца сканировалась с помощью планшетного сканера в режиме цветной передачи с разрешением 300 dpi, изображения сохранялись в формате BMP.

После сканирования с помощью компьютерной программы (см. рисунок) определялось количество пикселей, которые попадали в один из двадцати интервалов разбиения цветовых координат: H – оттенок (0–360°), S – насыщенность (0–100 %), B – яркость (0–100 %).



Рабочее окно программы определения количества пикселей, попадающих в интервалы разбиения

На основе полученных распределений (пример распределения для образца 10 приведен в табл. 1) вычислялись средневзвешенные значения H, S и B для каждого образца. Затем цветовые координаты модели HSB преобразовывали в цветовые координаты модели CIELAB, в которой  $L^*$  соответствует яркости,  $a^*$  – положению на

оси «красный – зелёный»,  $b^*$ - положению на оси «жёлтый – синий», что позволяет использовать их для расчёта цветовых различий  $\Delta E$ .

Цвет белого вяжущего без пигментов определён экстраполяцией по образцам с белым пигментом при концентрации 0,5 %:  $L_0^*=92,36$ ;  $a_0^*=-1,79$ ;  $b_0^*=6,82$ .

Т а б л и ц а 1

Распределение цветовых координат модели HSB для образца 10

№ интервала	Оттенок		Насыщенность		Яркость	
	Интервал	Частота	Интервал	Частота	Интервал	Частота
1	0 – 18	10	0 – 5	10	0 – 5	0
2	18 – 36	1	5-10	0	5-10	0
3	36 – 54	0	10-15	0	10-15	0
4	54 – 72	15	15 – 20	0	15 – 20	0
5	72 – 90	8	20 – 25	0	20 – 25	0
6	90 – 108	26	25 – 30	9	25 – 30	1
7	108 – 126	831	30 – 35	19	30 – 35	0
8	126 – 144	58605	35 – 40	72	35 – 40	1
9	144 – 162	298433	40 – 45	175	40 – 45	0
10	162 – 180	48876	45 – 50	405	45 – 50	0
11	180 – 198	871	50 – 55	974	50 – 55	1
12	198 – 216	0	55 – 60	1706	55 – 60	1
13	216 – 234	0	60 – 65	3331	60 – 65	16
14	234 – 252	0	65 – 70	5174	65 – 70	146
15	252 – 270	0	70 – 75	7511	70 – 75	1909
16	270 – 288	0	75 – 80	13019	75 – 80	19346
17	288 – 306	0	80 – 85	20959	80 – 85	105587
18	306 – 324	0	85 – 90	31655	85 – 90	244578
19	324 – 342	0	90 – 95	43137	90 – 95	35854
20	342 – 360	0	95 – 100	279520	95 – 100	236

### Результаты и их обсуждение

Для каждого образца после сканирования и преобразования RGB → HSB были получены средневзвешенные значения оттенка (H), насыщенности (S) и яркости (B). Результаты для 51 образца приведены в табл. 2.


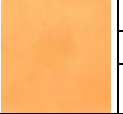
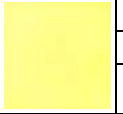

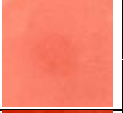





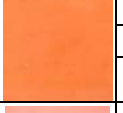
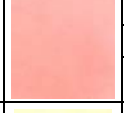
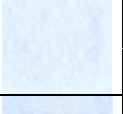


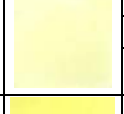
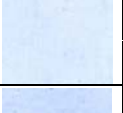

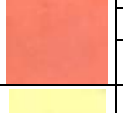
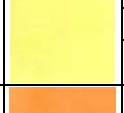

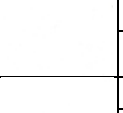



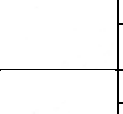
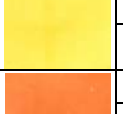
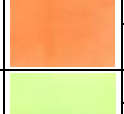


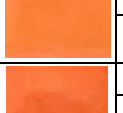
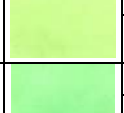










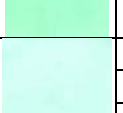



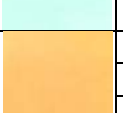
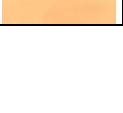
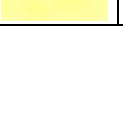

Данные табл. 2 показывают, что оттенок (H) варьируется от 3,51° (образцы с белым пигментом) до 208,8° (образцы с синим и чёрным пигментами). Насыщенность (S) для большинства цветных пигментов превышает 90 %, что свидетельствует о высокой интенсивности цвета. Исключение составляют образцы с малыми концентрациями пигментов 2, 5, 7 и 8, где насыщенность снижается до 3–30 %. Яркость (B) изменяется от 32,24 % (образец с чёрным пигментом 4 %) до 97,5 % (образцы с белым пигментом).

На основе полученных значений H, S, B было выполнено преобразование цветовых координат в пространстве CIELAB. Результаты колориметрических измерений 51 образца представлены в табл. 3.

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показывает, что при увеличении концентрации пигментов от 0,5 до 2,0 % наблюдается закономерное снижение яркости ( $L^*$ ), наиболее выраженное у красного и жёлтого пигментов (снижение до 45 % и 29 % соответственно) и наименее выраженное у синего пигмента (яркость практически не изменяется). Чёрный пигмент при концентрации 4,0 % обеспечивает минимальное значение яркости среди всех образцов ( $L^*=26,12$ ).

Т а б л и ц а 2

## Цветовые координаты образцов в модели HSB

1		H	31,06	14		H	27,39	27		H	62,98	41		H	26,71
		S	96,2			S	97,37			S	97,41			S	97,4
		B	79,79			B	69,66			B	73,06			B	69,16
2		H	18,66	15		H	27,21	28		H	27,38	42		H	101,8
		S	94,42			S	97,28			S	97,47			S	95,56
		B	70,23			B	60,86			B	63,67			B	92,27
3		H	13,07	16		H	45,71	29		H	23,83	43		H	45,38
		S	88,37			S	95,95			S	96,61			S	97,03
		B	43,17			B	86,79			B	63,7			B	82,34
4		H	22,25	17		H	44,96	30		H	16,94	44		H	63,23
		S	13,42			S	96,37			S	97,34			S	94,96
		B	97,49			B	85,17			B	79,6			B	88,41
5		H	29,47	18		H	33,27	31		H	14,85	45		H	62,98
		S	16,07			S	97,22			S	90,61			S	96,36
		B	97,47			B	76,09			B	69,24			B	74,95
6		H	51,82	19		H	13,52	32		H	62,45	46		H	27,03
		S	24,74			S	4,96			S	95,45			S	97,48
		B	97,45			B	97,5			B	82,98			B	65,05
7		H	54,88	20		H	10,64	33		H	55,79	47		H	26,25
		S	95,79			S	3,51			S	97,41			S	97,46
		B	77,43			B	97,5			B	67,77			B	67,07
8		H	47,88	21		H	10,92	34		H	26,18	48		H	82,63
		S	96,45			S	3,51			S	95,81			S	96,37
		B	67,25			B	97,5			B	61,54			B	79,31
9		H	47,93	22		H	204	35		H	16,26	49		H	117,7
		S	97,4			S	29,94			S	91,67			S	89,87
		B	59,04			B	32,24			B	59,04			B	79
10		H	152,6	23		H	208,8	36		H	75,31	50		H	206,8
		S	93,29			S	31,5			S	96,94			S	20,59
		B	86,1			B	82,41			B	76,31			B	60,25
11		H	147,4	24		H	205,4	37		H	149,4	51		H	209,7
		S	95,64			S	16,84			S	96,56			S	73,96
		B	81,55			B	54			B	82,82			B	91,13
12		H	144,5	25		H	62,96	39		H	165,9				
		S	68,01			S	96,75			S	97,09				
		B	66,5			B	90,12			B	91,3				
13		H	28,65	26		H	62,99	40		H	37,08				
		S	97,26			S	97,22			S	97,31				
		B	76,64			B	80,9			B	72,01				

## Экспериментальные цветовые координаты образцов в CIELAB

№	Вид пигмента	Количество, %	Вид пигмента	Количество, %	$L^*$	$a^*$	$b^*$
1	1	0,5	-	-	69,91	40,86	63,9
2	1	1	-	-	60,78	48,68	62,83
3	1	2	-	-	38,08	38,19	44,99
4	2	0,5	-	-	91,86	-5,98	34,19
5	2	1	-	-	91,95	-3,03	38,66
6	2	2	-	-	91,9	2,63	45,88
7	3	0,5	-	-	67,32	48,5	64,98
8	3	1	-	-	55,94	53,91	61,1
9	3	2	-	-	47,78	55,91	59,02
10	4	0,5	-	-	78,28	-49,94	32,55
11	4	1	-	-	73,21	-50,17	38,15
12	4	2	-	-	58,91	-34,72	29,25
13	5	0,5	-	-	66,39	46,05	66,73
14	5	1	-	-	59,26	47,69	62,69
15	5	2	-	-	50,4	50,02	59,31
16	6	0,5	-	-	79,7	34,86	78,91
17	6	1	-	-	77,89	36,61	77,21
18	6	2	-	-	65,81	46,12	72,38
19	7	0,5	-	-	92,4	-1,49	9,46
20	7	1	-	-	92,42	-1,99	5,35
21	7	2	-	-	92,42	-1,94	5,58
22	8	4	-	-	26,12	-11,96	-17,76
23	8	1	-	-	76,73	-12,51	-16,51
24	8	2	-	-	47,47	-9,09	-11,93
25	9	0,5	-	-	83,5	12,64	91,64
26	9	1	-	-	73,2	26,55	87,76
27	9	2	-	-	64,59	33,86	80,47
28	1	0,7	3	1,3	52,89	51,04	64,24
29	1	1,3	3	0,7	52,96	49,29	62,61
30	1	0,7	2	1,3	69,61	45,54	70,64
31	1	1,3	2	0,7	59,18	43,47	59,59
32	3	0,7	2	1,3	75,32	21,01	87,34
33	3	1,3	2	0,7	56,44	52,22	67,22
34	1	0,7	5	1,3	50,97	50,06	58,43
35	1	1,3	5	0,7	48,83	46,32	54,53
36	4	0,7	3	1,3	67,25	10,91	77,69
37	4	1,3	3	0,7	74,69	-49,64	39,81
39	2	1,3	4	0,7	84,97	-40,51	55,5
40	6	0,7	9	1,3	61,73	48,66	68,62
41	6	1,3	9	0,7	58,75	51,45	65,6
42	6	0,7	2	1,3	86,8	-36,32	64,04
43	6	1,3	2	0,7	75,06	38,9	76,83
44	9	0,7	2	1,3	81,54	11,93	91,46
45	9	1,3	2	0,7	66,25	32,25	81,13
46	6	0,7	5	1,3	54,24	50,99	64,72
47	6	1,3	5	0,7	56,26	49,63	65,95
48	4	0,7	9	1,3	70,19	-5,29	75,65
49	4	1,3	9	0,7	69,71	-36,69	45,21
50	7	1,3	8	2,7	53,82	-11,52	-11,61
51	7	2,7	8	1,3	85,71	-26,72	-16,27

По влиянию на координату  $a^*$  (ось красный – зелёный) пигменты разделяются на две группы: пигменты 1, 3, 5, 6 и 9 сдвигают цвет в красную область (положительные значения  $a^*$ ), тогда как пигменты 2, 4, 7 и 8 – в зелёную (отрицательные значения  $a^*$ ). Наиболее сильное смещение в красную область дают жёлтый и красный пигменты, в зелёную – зелёный пигмент. По влиянию на координату  $b^*$  (ось жёлтый – синий) все пигменты, за исключением чёрного, сдвигают цвет в жёлтую область. Максимальные значения  $b^*$  (до 91,6) зафиксированы для кадмия жёлтого, что свидетельствует о его высокой насыщенности. Белый пигмент практически не изменяет цветовые координаты, подтверждая свою роль инертного наполнителя-корректора. Нелинейные эффекты (снижение координат  $a^*$  или  $b^*$  при увеличении концентрации свыше 1,0 %) наблюдаются для красного и зелёного пигментов, что связано с насыщением цвета и перекрытием частиц при высоких концентрациях.

Двухкомпонентные смеси (образцы 28–51) демонстрируют промежуточные цветовые характеристики, которые в большинстве случаев лежат внутри области, образованной соответствующими чистыми пигментами. Например, смеси красного (пигмент 1) и жёлтого (пигмент 3) пигментов (образцы 28, 29) имеют координаты  $a^*=49-51$ ,  $b^*=62-64$ , что соответствует оранжево-жёлтой области. Смеси синего (пигмент 2) и зелёного (пигмент 4) пигментов (образец 39) дают  $a^*=-40,51$ ,  $b^*=55,50$  (зеленовато-голубой оттенок). Смеси кадмия жёлтого (пигмент 9) и синего (пигмент 2) пигмента (образцы 44, 45) демонстрируют высокие значения  $b^*$  (81–91) при положительных или слабоотрицательных  $a^*$ .

Цвет двухкомпонентных смесей не является линейной комбинацией цветов отдельных пигментов, что подтверждает наличие оптических взаимодействий. Тем не менее в диапазоне концентраций 0–2 % отклонения от линейности не превышают 7 % для  $L^*$  и 5 % для  $a^*$ ,  $b^*$ , что позволяет использовать линейную аддитивную модель.

Для описания зависимости цветовых координат от концентраций пигментов выбрана линейная модель, обладающая наилучшей интерпретируемостью; её коэффициенты непосредственно характеризуют вклад каждого пигмента в цвет. Высокие значения коэффициента детерминации ( $R^2 \geq 0,99$ ) подтверждают адекватность модели.

Уравнения модели имеют вид:

$$L^* = L_0^* + \sum_{i=1}^n \beta_{L,i} \cdot x_i,$$

$$a^* = a_0^* + \sum_{i=1}^n \beta_{a,i} \cdot x_i,$$

$$b^* = b_0^* + \sum_{i=1}^n \beta_{b,i} \cdot x_i,$$

где  $x_i$  – концентрация  $i$ -го пигмента, % от массы вяжущего;  $\beta_{L,i}$ ,  $\beta_{a,i}$ ,  $\beta_{b,i}$  – коэффициенты регрессии, показывающие, на сколько единиц изменяется соответствующая координата при добавлении пигмента;  $L_0^*$ ,  $a_0^*$ ,  $b_0^*$  – цветовые координаты белого вяжущего без пигмента ( $L_0^*=92,36$ ,  $a_0^*=-1,79$ ,  $b_0^*=6,82$ );  $n$  – количество использованных пигментов ( $n=9$ ).

Для указанной модели и всех используемых в исследовании пигментов методом наименьших квадратов были определены коэффициенты регрессии, которые приведены в табл. 4.

Отрицательные  $\beta_L$  указывают на снижение яркости всеми цветными и чёрным пигментами (наибольшее – у красного, наименьшее – у синего). Положительные  $\beta_a$  (пигменты 1, 3, 5, 6, 9) сдвигают цвет в красную область, отрицательные (2, 4, 7, 8) – в зелёную. Положительные  $\beta_b$  (все, кроме пигмента 8) сдвигают цвет в жёлтую область, отрицательный  $\beta_b$  (пигмент 8) – в синюю. Пигмент 7 (белый) имеет коэффициенты, близкие к нулю, подтверждая роль инертного разбавителя.

Кoeffициенты линейной регрессионной модели для зависимости цветковых координат  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  от концентрации пигментов

№ пигмента	Наименование пигмента	$\beta_L$	$\beta_a$	$\beta_b$
1	Красный ( $Fe_2O_3$ )	-44,87	84,21	110,95
2	Синий (ультрамарин)	-0,75	7,48	26,38
3	Жёлтый ( $FeOOH$ )	-38,22	88,95	81,27
4	Зелёный ( $Cr_2O_3$ )	-27,94	-78,16	41,05
5	Оранжевый ( $Fe_2O_3 + FeOOH$ )	-33,48	78,92	86,53
6	Кадмий красный средний (CdS/CdSe)	-20,18	40,07	71,65
7	Белый ( $TiO_2$ , рутил)	-0,19	-0,38	-0,87
8	Чёрный ( $Fe_3O_4$ )	-28,55	-11,09	-24,38
9	Кадмий жёлтый (CdS)	-19,97	24,21	98,48

Для решения прямой задачи воспользуемся моделью зависимости цветковых координат и рассчитаем эти координаты для смеси, содержащей, 0,5 % красного пигмента (№1) и 1,0 % синего пигмента (№2):

$$L^* = 92,36 + (-44,87 \cdot 0,5) + (-0,75 \cdot 1,0) = 92,36 - 22,44 - 0,75 = 69,17;$$

$$a^* = -1,79 + (84,21 \cdot 0,5) + (7,48 \cdot 1,0) = -1,79 + 42,11 + 7,48 = 47,80;$$

$$b^* = 6,82 + (110,95 \cdot 0,5) + (26,38 \cdot 1,0) = 6,82 + 55,48 + 26,38 = 88,68.$$

Решение обратной задачи – подбор рецептуры – заключается в том, что для получения заданного целевого цвета ( $L_t^*$ ,  $a_t^*$ ,  $b_t^*$ ) требуется найти концентрации пигментов  $x_i$  (в % от массы вяжущего), которые удовлетворяют условиям неотрицательности ( $x_i \geq 0$ ) и технологическому ограничению (суммарная концентрация не более 5 %), а также обеспечивают минимальное цветовое различие

$$\Delta E = \sqrt{(L_t^* - L_{calc}^*)^2 + (a_t^* - a_{calc}^*)^2 + (b_t^* - b_{calc}^*)^2},$$

где  $L_{calc}^*$ ,  $a_{calc}^*$ ,  $b_{calc}^*$  – координаты цвета, рассчитанные по регрессионной модели для заданного состава.

Поскольку уравнений три (по числу цветковых координат), а переменных девять (по числу пигментов), система является недоопределённой. На практике используют ограниченное количество пигментов, обычно два или три. Поэтому задача решается в два этапа: сначала выполняется перебор возможных комбинаций из одного-трёх пигментов из девяти доступных, затем для каждой комбинации решается линейная система (для трёх пигментов) или применяется метод наименьших квадратов с ограничениями (для одного или двух пигментов).

При выборе трех пигментов с номерами  $p$ ,  $q$  и  $r$  решается система линейных уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \beta_{L,p} \cdot x_p + \beta_{L,q} \cdot x_q + \beta_{L,r} \cdot x_r = L_t^* - L_0^*, \\ \beta_{a,p} \cdot x_p + \beta_{a,q} \cdot x_q + \beta_{a,r} \cdot x_r = a_t^* - a_0^*, \\ \beta_{b,p} \cdot x_p + \beta_{b,q} \cdot x_q + \beta_{b,r} \cdot x_r = b_t^* - b_0^*, \end{cases}$$

где  $x_p$ ,  $x_q$ ,  $x_r$  – искомые концентрации выбранных пигментов, % от массы вяжущего;  $\beta_{L,p}$ ,  $\beta_{L,q}$ ,  $\beta_{L,r}$  – коэффициенты регрессии для этих пигментов по координате  $L^*$  (аналогично для остальных  $a^*$ ,  $b^*$ );  $L_t^*$ ,  $a_t^*$ ,  $b_t^*$  – целевые цветковые координаты;  $L_0$ ,  $a_0$ ,  $b_0$  – цветковые координаты белого вяжущего.

В матричной форме эта система имеет вид

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \Delta \mathbf{C},$$

где  $x = [x_p, x_q, x_r]^T$  – вектор-столбец искомых концентраций;  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_{L,p} & \beta_{L,q} & \beta_{L,r} \\ \beta_{a,p} & \beta_{a,q} & \beta_{a,r} \\ \beta_{b,p} & \beta_{b,q} & \beta_{b,r} \end{bmatrix}$  – матрица

коэффициентов для выбранных пигментов;  $\mathbf{B}^{-1}$  – обратная матрица  $\mathbf{B}$ ;

$\Delta\mathbf{C} = \begin{bmatrix} L_t^* - L_0^* \\ a_t^* - a_0^* \\ b_t^* - b_0^* \end{bmatrix}$  – вектор-столбец разностей между целевыми цветовыми координатами и координатами белой основы.

Решение существует и единственно, если матрица невырождена (ее определитель не равен нулю), что на практике выполняется для большинства комбинаций различных пигментов.

Произведем расчет для целевого цвета со следующими параметрами:  $L_t^* = 65$ ,  $a_t^* = 30$ ,  $b_t^* = 50$ . Для получения заданного цвета используем пигменты: 1 (красный), 2 (синий) и 9 (кадмий жёлтый) в % от массы вяжущего. По приведенным выше формулам рассчитаем дозировки указанных пигментов. В расчете примем известные координаты белого вяжущего ( $L_0^* = 92,36$ ,  $a_0^* = -1,79$ ,  $b_0^* = 6,82$ ), коэффициенты уравнения регрессии  $\beta_L, \beta_a, \beta_b$  для выбранных пигментов из табл. 3.

$$\text{Составим матрицу коэффициентов } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -44,87 & -0,75 & -19,97 \\ 84,21 & 7,48 & 24,21 \\ 110,95 & 26,38 & 98,48 \end{bmatrix}.$$

Рассчитаем вектор разностей цветовых координат:

$$\Delta\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 65 - 92,36 \\ 30 - (-1,79) \\ 50 - 6,82^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -27,36 \\ 31,79 \\ 43,18 \end{bmatrix}$$

В ходе расчета системы  $\mathbf{X} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \Delta\mathbf{C}$  получены следующие дозировки пигментов:

$$x_1 = 0,31 \%; x_2 = 1,15 \%; x_3 = 0,22 \%.$$

Расчётный цвет совпадает с целевым с точностью  $\Delta E \approx 0,1$ .

### Выводы

На основе экспериментальных данных определения цвета 51 образца цветного мелкозернистого бетона на белом цементе с 9 видами пигментов построена линейная регрессионная модель, связывающая концентрации пигментов (в % от массы вяжущего) с цветовыми координатами  $L^*a^*b^*$ . Коэффициент детерминации  $R^2 \geq 0,99$  подтверждает высокую точность модели.

Разработан метод решения обратной задачи – расчёта концентраций пигментов для достижения заданного целевого цвета ( $L_t^*, a_t^*, b_t^*$ ) с учётом технологических ограничений. Получены аналитические зависимости, позволяющие значительно сократить время подбора вида и дозировки пигментов для получения цветного бетона заданного цвета. Предложенный подход может быть распространён на другие виды пигментов, а также использован для создания автоматизированных систем цветового проектирования бетонных изделий.

### Список литературы

1. Cheng, X. Color in Urban Public Spaces: A Systematic Review for Evidence-Based Design / X. Cheng, G. Zhao, M. Xie, // Buildings. – 2025. – 15. – 4474. – URL: <https://doi.org/10.3390/buildings15244474>.
2. Caivano, J.L. Appearance / J.L. Caivano // Encyclopedia of Color Science and Technology / ed. by Ming Ronnier Luo. – New York : Springer, 2016. – P. 41–47.

3. Utěšená, M. Color Intensity of Architectural Concrete Depending on the Type of Cement / M. Utěšená, R. Pernicová // *Materials Science Forum*. – 2020. – 986. – P. 50–54.
4. Wang, Yi. Color and mechanical property degradation of blue concrete under freeze-thaw cycles: An experimental study / Yi, Wang Yan Liu, Ridho Surahman, Xijuan Zhao // *Cold Regions Science and Technology*. – 2025. – Vol. 236. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104515>.
5. Родикова, Е.В. Влияние минеральных добавок на высолообразование в декоративных мелкозернистых бетонах / Е.В. Родикова, Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, Т.С. Гаёва // *Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства : сборник докладов VII Национальной научно–практической конференции*. – Пенза, 2024. – С. 66–69.
6. Fairchild, M.D. CIE 015:2018 Colorimetry / M.D. Fairchild. – 4th Edition. – The International Commission on Illumination, Vienna, Austria, 2019. – 111 p.
7. Luo, M.R. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 / M.R. Luo, G. Cui, B. Rigg // *Color Research and Application*. – 2001. – Vol. 26, No. 5. – P. 340–350.
8. Bandpay, M.G. Mathematical and empirical evaluation of accuracy of the Kubelka–Munk model for color match prediction of opaque and translucent surface coatings / M.G. Bandpay, F. Ameri, K. Ansari [et al.]// *Journal of Coatings Technology and Research*. – 2018. – Vol. 15. – P. 1117–1131.
9. Berns, R.S. Billmeyer and Saltzman’s Principles of Color Technology / R.S. Berns. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2019. – 256 p.

#### References

1. Cheng, X. Color in Urban Public Spaces: A Systematic Review for Evidence-Based Design / X. Cheng, G. Zhao, M. Xie, // *Buildings*. – 2025. – 15. – 4474. – URL: <https://doi.org/10.3390/buildings15244474>.
2. Caivano, J.L. Appearance / J.L. Caivano // *Encyclopedia of Color Science and Technology* / ed. by Ming Ronnier Luo. – New York : Springer, 2016. – P. 41–47.
3. Utěšená, M. Color Intensity of Architectural Concrete Depending on the Type of Cement / M. Utěšená, R. Pernicová // *Materials Science Forum*. – 2020. – 986. – P. 50–54.
4. Wang, Yi. Color and mechanical property degradation of blue concrete under freeze-thaw cycles: An experimental study / Yi, Wang Yan Liu, Ridho Surahman, Xijuan Zhao // *Cold Regions Science and Technology*. – 2025. – Vol. 236. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104515>.
5. Rodikova, E.A. Influence of mineral additives on efflorescence in decorative fine-grained concretes / E.A. Rodikova, N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin, T.S. Gayeva // In: *Current Problems of Science and Practice in Various Sectors of the National Economy: Proceedings of the VII National Scientific and Practical Conference*. – Penza, 2024. – P. 66–69.
6. Fairchild, M.D. CIE 015:2018 Colorimetry / M.D. Fairchild. – 4th Edition. – The International Commission on Illumination, Vienna, Austria, 2019. – 111 p.
7. Luo, M.R. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 / M.R. Luo, G. Cui, B. Rigg // *Color Research and Application*. – 2001. – Vol. 26, No. 5. – P. 340–350.
8. Bandpay, M.G. Mathematical and empirical evaluation of accuracy of the Kubelka–Munk model for color match prediction of opaque and translucent surface coatings / M.G. Bandpay, F. Ameri, K. Ansari [et al.]// *Journal of Coatings Technology and Research*. – 2018. – Vol. 15. – P. 1117–1131.
9. Berns, R.S. Billmeyer and Saltzman’s Principles of Color Technology / R.S. Berns. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2019. – 256 p.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

**Гвоздева Ольга Михайловна,**  
магистрант  
E-mail: olgagvozdevaaa@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

**Kuzina Valentina Vladimirovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of the  
department «Information and computing systems»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Gvozdeva Olga Mikhailovna,**  
Master's student  
E-mail: olgagvozdevaaa@yandex.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Кузина, О.М. Гвоздева

Представлены постановка и решение задачи оптимизации технологических параметров процессов электроосаждения металлов в проточных трехмерных электродах из углеродных волокнистых материалов методами математического моделирования. С целью получения требуемой равномерности распределения металлического осадка приняты в качестве управляющих функций распределенное удельное сопротивление и распределенная реакционная поверхность углеграфитового волокнистого материала. Приводится решение задачи оптимизации параметров электрохимической системы на основе выбора распределенной электропроводности углеродных волокнистых материалов в параболической форме.

*Ключевые слова: электроосаждение металлов, проточный трехмерный электрод, углеграфитовый волокнистый материал, математическое моделирование, оптимизация параметров*

## MATHEMATICAL DESCRIPTION AND CALCULATION OF METALLIZATION PROCESSES OF CARBON FIBRE MATERIALS

V.V. Kuzina, O.M. Gvozdeva

The paper presents the formulation and solution of a problem for optimizing the process parameters of metal electrodeposition processes in flow-through three-dimensional electrodes made of carbon fiber materials using mathematical modeling methods. To achieve the required uniformity of metal deposit distribution, the distributed resistivity and distributed reaction surface of the carbon-graphite fiber material are adopted as control functions. A solution is presented for optimizing the electrochemical system parameters based on the selection of a parabolic distributed electrical conductivity of the carbon fiber materials.

*Keywords: metal electrodeposition, flow-through three-dimensional electrode, carbon-graphite fiber material, mathematical modeling, parameter optimization*

### **Введение.**

Металлизированные углеродные волокна служат основой для материалов, применяемых в различных областях производства. В строительстве их использование обусловлено разнообразием свойств, которые можно получать, в частности, изменением параметров электрохимической системы при гальваническом способе металлизации [1].

Наиболее эффективным методом исследования и оптимизации свойств проточных трехмерных электродов (ПТЭ) из углеродистых материалов является математическое моделирование электрохимических процессов, позволяющее проанализировать большое число вариантов на основе проведения компьютерных вычислительных экспериментов. Оптимальный подбор электрохимических параметров способствует созданию технологических производств для получения равномерных металлопокрытий углеродных волокнистых материалов (УВМ), что является актуальной проблемой [2–6].

Ранее нами ставились задачи и обсуждались методы получения равномерного осадка на проточных трехмерных электродах [1–6]. Целью данной работы является определение оптимальных технологических параметров процесса электроосаждения металлов в проточных трехмерных электродах из углеродистых волокнистых материалов.

#### Постановка задачи.

Для построения математической модели процесса электроосаждения металлов в проточных трехмерных электродах из углеродистых волокнистых материалов (УВМ) необходимо использовать положения классической теории материального баланса в потоке заряженных частиц, принимающих участие в электрохимических реакциях [1]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\text{div}(z_i \mu_i F C_i \text{grad}(E) + C_i \mathbf{v}). \quad (1)$$

В уравнении (1)  $z_i$ ,  $C_i$ ,  $\mu_i$  – соответственно заряд, концентрация и подвижность  $i$ -го электроактивного компонента в гомогенной или псевдогомогенной среде;  $F$  – число Фарадея;  $\text{grad}(E)$  – градиент потенциала электрического поля  $E$ ;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости конвективного переноса электролита;  $\text{div}$  – дивергенция вектора.

При технологической реализации процесса электроосаждения металла в ПТЭ в большинстве практически реализуемых случаев математическое описание процесса сводится к одномерным по толщине ПТЭ обыкновенным дифференциальным и алгебраическим уравнениям [2]:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = S_V \left( \frac{1}{\kappa_T} + \frac{1}{\kappa_G} \right) J_S(x); \quad (2)$$

$$\mathbf{v} z F \frac{dC}{dx} = -S_V J_S(x); \quad (3)$$

$$J_S(x) = j_0 \frac{\exp(\alpha z F (E - \varphi) / RT) - \exp((\alpha - 1) z F (E - \varphi) / RT)}{1 + j_0 \exp(\alpha z F (E - \varphi) / RT) / z F K_m C}; \quad (4)$$

$$\frac{dE}{dx}(t, 0) = \frac{I}{\kappa_T(0)}, \quad \frac{dE}{dx}(t, L) = -\frac{I}{\kappa_G}, \quad C(t, 0) = C_0. \quad (5)$$

Здесь  $S_V$  – удельная реакционная поверхность,  $\text{см}^2/\text{см}^3$ ;  $J_S$  – плотность поляризующего тока по металлу,  $\text{А}/\text{см}^2/\text{см}$ ;  $I$  – плотность габаритного тока, подаваемого на ПТЭ;  $L$  – толщина ПТЭ;  $C_0$  – концентрация ионов металла в объеме подаваемого в ПТЭ электролита;  $\kappa_T$  и  $\kappa_G$  – удельные электропроводности твердой и жидкой фаз системы;  $x$  – координата по толщине электрода.

#### Метод решения задачи.

Решение двухточечной задачи (2), (5) для системы обыкновенных уравнений удобно осуществлять методом Рунге – Кутты с автоматическим выбором шага интегрирования с использованием метода стрельбы: путем сведения двухточечной задачи к задаче Коши с последующим подбором начального условия для функции потенциала электрода.

Необходимо отметить, что ранее нами доказана классическая неустойчивость задачи (2), (5) по начальным данным и по правой части [2].

Для преодоления сложностей, связанных с численной реализацией неустойчивости задачи, нами получено аналитическое выражение для оценки начального условия с целью последующего использования при разработке вычислительных процедур:

$$E(0) \approx \frac{2}{A} \ln \left( \frac{AI}{2\kappa_T^2 B j_0} \right),$$

где  $A, B$  – комплексы электрохимических констант.

#### Постановка задачи оптимизации.

При постановке задачи оптимизации технологических параметров процессов металлизации УВМ необходимо определить критерий оптимизации в виде выражений, характеризующих равномерность распределения плотности электрического тока и потенциала по толщине ПТЭ, с целью получения требуемой равномерности распределения металлического осадка в УВМ [3–5]. Нами выбран следующий критерий оптимизации:

$$\min \left[ \sigma(u) = \int_0^L \left( \frac{I}{L} - J_s(x) \right)^2 dx \right]. \quad (6)$$

#### Решение задачи оптимизации.

Решение задачи оптимизации осуществлялось двумя способами: методом выбора простого управления и посредством принципа максимума С.Л. Понтрягина. В первом случае критерий оптимизации рассчитывался для различных форм зависимостей  $u = \kappa_T(x)$  и  $u = S_V(x)$ , например, линейных или квадратичных форм с последующим выбором наилучшего варианта путем расчета оптимальных значений коэффициентов выбранных кривых.

После переопределения и переобозначений комплексов электрохимических параметров в общем виде задача оптимизации сформулирована в следующей форме: определить управляющие воздействия на процесс металлизации УВМ –  $u_1 = d\kappa_T(x)/dx$ ;  $u_2 = S_V(x)$  при заданных дифференциальных ограничениях:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dx} = f_1(y_1, y_2, y_3, u), \\ \frac{dy_2}{dx} = f_2(y_1, y_2, y_3, u), \\ \frac{dy_3}{dx} = f_3(y_1, y_2, y_3, u) \end{cases} \quad (7)$$

где функции  $f_i$  определяются правыми частями уравнений (2) – (5).

Для решения задачи (6), (7) мы использовали методы прямого расчета функций  $u_1(x)$ ,  $u_2(x)$ , а также классический принцип максимума С.Л. Понтрягина.

#### Выбор распределенной электропроводности УВМ в параболической форме.

Удельная распределенная электропроводность УВМ рассчитывалась, как параболическая функция с неизвестными коэффициентами:  $\kappa_T(x) = Ax^2 + Bx + C$ . Результаты расчетов представлены в таблице.

№ строки	$A$	$B$	$C$	$\sigma(\kappa_m)$
1			0,3	0,007569
2		0,25	0,3	0,007921
3		-0,75	0,5	0,006556
4	-20	8	0,2	0,005846
5	10	-4	0,7	0,010417
6	-1,972	0,039	0,5	0,006277
7	2,63	-0,053	0,3	0,008852
8	-0,625	0,5	0,2	0,00799
9	5	-4	1	0,007795

---

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что наилучшая равномерность распределения тока и металла по толщине УВМ наблюдается при распределении удельной электропроводности УВМ в виде параболы с ветвями, расположенными вниз относительно координатной оси абсцисс (строка 4).

**Заключение.** Таким образом, в результате проведенного исследования определены оптимальные технологические параметры процесса электроосаждения металлов в проточных трехмерных электродах из углеродистых волокнистых материалов.

### Список литературы

1. Электролизеры и электрохимические процессы с проточными трехмерными углеродными электродами. Основы разработки, математическое моделирование, теоретические и экспериментальные исследования, промышленное освоение : монография / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза : ПГУАС, 2025. – 360 с. – ISBN 978-5-9282-1769-3.

2. Кошев, А.Н. Распределенная реакционная поверхность углеродистых объемно-пористых катодов как параметр оптимизации процесса металлизации композиционных и нанокomпозиционных материалов / А.Н. Кошев, В.В. Кузина // Нанотехнологии в строительстве. – 2025. – № 17 (2). – С. 119–131. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131>. – EDN: XWDYCA.

3. Варенцов, В.К. Реакционная поверхность, как одна из важнейших характеристик композитов и нанокomпозитов, создаваемых на основе металлизации углеродистых волокнистых материалов / В.К. Варенцов, В.В. Кузина, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 92–98.

4. Кузина, В.В. Изменение удельной реакционной поверхности углеродистого волокнистого электрода при гальванической металлизации / В.В. Кузина, А.Д. Рыжов, А.Н. Кошев, В.К. Варенцов // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 3 (64). – С. 73–77.

5. Кошев, А.Н. Оптимизация процесса металлизации углеродных волокон при распределенной реакционной поверхности углеродистого волокнистого электрода / А.Н. Кошев, В.В. Кузина, О.М. Гвоздева, В.К. Варенцов // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4 (65). – С. 32–37.

6. Варенцов, В.К. Металлизация проточных трехмерных катодов с распределенными по толщине электропроводностью и удельной реакционной поверхностью / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.В. Кузина. – DOI 10.54734/20722958\_2026\_1\_17 // Региональная архитектура и строительство. – 2026. – № 1 (66). – С. 17–26.

### References

1. Electrolyzers and electrochemical processes with flow-through three-dimensional carbon electrodes. Development principles, mathematical modeling, theoretical and experimental studies, industrial development : monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova, V.V. Kuzina. – Penza : PSUAC, 2025. – 360 p. – ISBN 978-5-9282-1769-3.

2. Koshev, A.N. Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials. / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // Nanotechnologies in Construction. – 2025. – No 17(2). – P. 119–131. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131>. – EDN: XWDYCA.

3. Varentsov, V.K. Reaction surface as one of the most important characteristics of composites and nanocomposites created based on metallization of carbon-graphite fibrous materials / V.K. Varentsov, V.V. Kuzina, A.N. Koshev // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 2 (63). – P. 92–98.

4. Kuzina, V.V. Change in the specific reaction surface of a carbon-graphite fiber electrode during galvanic metallization / V.V. Kuzina, A.D. Ryzhov, A.N. Koshev, V.K. Varentsov // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 3 (64). – P. 73–77.

---

5. Koshev, A.N. Optimization of the metallization process of carbon fibers with a distributed reaction surface of a carbon-graphite fiber electrode. / A.N. Koshev, V.V. Kuzina, O.M. Gvozdeva, V.K. Varentsov. – DOI: 10.54734/20722958\_2025\_4\_32. // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 4 (65). – P. 32–37.

6. Varentsov, V.K. Metallization of flow-through three-dimensional cathodes with electrical conductivity and specific reaction surface distributed over the thickness / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.V. Kuzina. – DOI: DOI 10.54734/20722958\_2026\_1\_17 // Regional architecture and engineering. – 2026. – No. 1 (66). – P. 17–26.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

**Семилетков Александр Викторович**,  
ассистент кафедры «Технологии  
строительных материалов и  
деревообработки»

**Бортунова Валерия Игоревна**,  
студентка  
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

**Lavrov Ivan Yurievich**,  
Assistant of the department «Building Materials  
and Woodworking Technology»

**Semiletkov Aleksandr Viktorovich**,  
Assistant of the department «Building Materials  
and Woodworking Technology»

**Bortunova Valeria Valeriya Igorevna**,  
Student  
E-mail: techbeton@pguas.ru

## ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ ЦЕМЕНТНЫЙ КОМПОЗИТ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

И.Ю. Лавров, А.В. Семилетков, В.И. Бортунова

Представлены результаты разработки мелкозернистой бетонной смеси для технологии послойного экструдирования (строительной 3D-печати), способной твердеть в неблагоприятных температурно-влажностных условиях без традиционных мероприятий по уходу. Эффект достигается совместным введением суперабсорбирующего полимера (полиакрилата натрия) и целлюлозной микрофибры из отходов целлюлозно-бумажного производства, реализующих механизм внутреннего ухода. Определены оптимальные составы смеси, включающие метакаолин, микрокальцит, кварцевый песок и гиперпластификатор на поликарбонатной основе. Показано, что в разработанной смеси при твердении в воздушных условиях ( $t = 23-25$  °С,  $\phi = 55-65$  %) обеспечивается прочность при сжатии через 28 суток до 57 МПа и прочность при изгибе до 6,0 МПа.

*Ключевые слова: цементный композит, мелкозернистый бетон, строительная 3D-печать, суперабсорбирующий полимер, внутренний уход, целлюлозное волокно*

## DISPERSED-REINFORCED CEMENT COMPOSITE FOR CONSTRUCTION 3D PRINTING

I.Yu. Lavrov, A.V. Semiletkov, V.I. Bortunova

This article presents the results of developing a fine-grained concrete mix for layer-by-layer extrusion technology (3D construction printing) capable of curing under adverse temperature and humidity conditions without traditional curing measures. This effect is achieved through the combined introduction of a superabsorbent polymer (sodium polyacrylate) and cellulose microfiber from pulp and paper production waste, implementing an internal curing mechanism. Optimal mixture compositions were determined, including metakaolin, microcalcite, quartz sand, and a polycarboxylate-based hyperplasticizer. It is shown that the developed mix, when cured in air ( $t = 23-25$  °C,  $\phi = 55-65$  %), provides compressive strength of up to 57 MPa and flexural strength of up to 6.0 MPa after 28 days.

*Keywords: cementitious composite, fine-grained concrete, construction 3D printing, superabsorbent polymer, internal care, cellulose fiber*

### Введение

Технологии строительной 3D-печати являются одними из наиболее быстроразвивающихся направлений аддитивного производства [1, 2]. Ключевой особенностью этого процесса является непрерывное нанесение слоёв экструдированной смеси в

условиях открытой атмосферы, что приводит к интенсивному испарению влаги поверхностью свежееуложенного материала. Применительно к строительной 3D-печати традиционные наружные методы ухода (укрытие пленкой, засыпка влажными опилками, периодическое увлажнение и пр.) труднодоступны, а порой и невозможны, что заставляет искать альтернативные технологические решения. Одним из них является способ внутреннего ухода за бетоном, суть которого заключается во введении в состав смеси насыщенных водой пористых компонентов или суперабсорбирующих полимеров (САП). САП аккумулируют влагу и по мере падения влажности бетона постепенно отдают ее, поддерживая более оптимальные условия для гидратации цемента.

Целью работы являлась разработка и исследование свойств модифицированного цементного композита для строительной 3D-печати с пониженным расходом цемента, добавкой полиакрилата натрия и целлюлозной микрофибры.

#### **Материалы и методы**

Используемые сырьевые компоненты имеют следующие характеристики:

– портландцемент ЦЕМ I 42,5 производства ООО «Азия Цемент» (ГОСТ 31108-2020) следующего минералогического состава:  $C_3S$  – 67,3 %;  $C_2S$  – 11,9 %;  $C_3A$  – 6,7 %;  $C_4AF$  – 11,9 %;

– активная минеральная добавка – метакаолин ВМК-45 (ГОСТ 59536-2021) ( $S_{уд} = 1700 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) с пуццолановой активностью 1250 мг/г;

– минеральный наполнитель – микрокальцит ММ-315 ( $S_{уд} = 230 \text{ м}^2/\text{кг}$ );

– песок кварцевый мелкий с модулем крупности 1,8 (ГОСТ 8736-2014);

– целлюлозная микрофибра со средней длиной волокна 3.2 мм, средним диаметром 0,032 мм, являющаяся отходом целлюлозно-бумажного производства, образующимся при локальной очистке оборотных вод комбината. Волокна представлены преимущественно сульфатной небеленой целлюлозой с прочностью при растяжении 80-90 МПа;

– САП – полиакрилат натрия с абсорбционной способностью 220–250 г<sub>н<sub>2</sub>о</sub>/г (средний диаметр гранул 0,1–0,5 мм);

– порошкообразный гиперпластификатор на основе модифицированных поликарбонатных эфиров «Sika ViscoCrete-226P».

На первом этапе приготовления бетонной смеси готовили раствор затворения. В воду вводили расчетное количество САП и гиперпластификатора, смесь выдерживали в течение двух часов при комнатной температуре для полного насыщения полимера водой. Далее в турбулентный бетоносмеситель (частота вращения 600 об/мин) загружали все сухие компоненты – цемент, метакаолин, микрокальцит, песок и целлюлозную микрофибру – и перемешивали до однородного цвета и равномерного распределения волокон. После этого добавляли ранее заготовленный раствор затворения и производили окончательное перемешивание в течение 5 минут.

Пластическую прочность бетонной смеси определяли с помощью конического пластометра. Формоустойчивость оценивали как отношение предельной высоты столба экструдата к его среднему диаметру в момент разрыва или потери устойчивости при вертикальном подъеме экструдера со скоростью 200 мм/мин при стопроцентном значении потока.

Образцы формовали экструзией и оставляли твердеть в воздушных условиях при температуре 23–25 °С и относительной влажности 55–65 % без дополнительного ухода. Прочность межслоевого шва на отрыв измеряли через 1 сутки твердения (время межслоевой выдержки 10 мин) с помощью универсальной разрывной машины, снабженной специальными захватами [3]. Пределы прочности при сжатии и изгибе определяли в возрасте 1 и 28 суток на образцах с прошлифованными опорными гранями.

#### **Экспериментальная часть**

Специфика строительной трехмерной печати заключается в большой открытой площади поверхности напечатанных изделий, что ускоряет испарение влаги из твердеющего бетона, вызывая опасность трещинообразования и понижения прочности. Многочисленными исследованиями установлено, что твердение бетона в неблагоприятных температурно-влажностных условиях (низкая относительная влажность, повышенная температура) может значительно влиять на его физико-механические

свойства [4, 5]. В работах [6, 7] показано снижение прочности бетона, твердевшего в неблагоприятных условиях в течение 28 суток, на 40–70 % по сравнению с материалом, твердевшим в нормальных условиях (ГОСТ 18105-2018) при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $(95 \pm 5)\%$ .

Внутренний уход за бетоном реализуется путём введения в его состав насыщенных водой пористых заполнителей или суперабсорбирующих полимеров, которые аккумулируют технологическую влагу и постепенно отдают её, создавая благоприятные условия твердения. Кроме того, по имеющимся данным введение САП снижает пластическую усадку бетонных смесей [8, 9].

Применяются три основных способа применения суперабсорбирующих полимеров в технологии бетона:

- введение САП, насыщенного водой, в виде гидрогеля [10, 11];
- введение компонентов САП с отложенной полимеризацией [12];
- введение сухого САП в виде порошка или гранул [8, 13].

Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки.

Предварительными исследованиями [14], выполненными с использованием сталагмометрического метода, установлено, что частицы полиакрилата натрия не сорбируют молекулы поликарбоксилатного гиперпластификатора. При введении сухого САП в 0,5–1 %-е растворы Melflux 5581F поверхностное натяжение фильтрата остаётся равным исходному (рис.1), что свидетельствует о сохранении концентрации добавки в жидкой фазе.

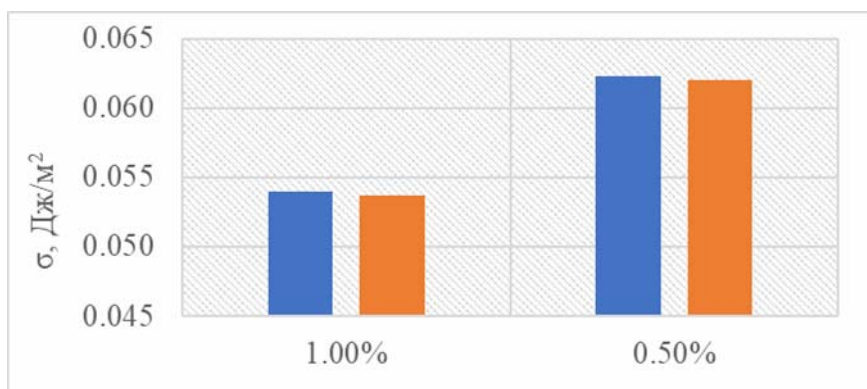


Рис.1. Изменение коэффициентов поверхностного натяжения  $\sigma$  0,5- и 1 %-х растворов пластификатора (оранжевый столбец) после добавления к ним сухого САП (синий столбец)

Таким образом, установлено, что раствор гиперпластификатора поглощается гранулами полиакрилата натрия без разделения, и адсорбция полимера на поверхности САП отсутствует. Это указывает на совместимость полиакрилата натрия и поликарбоксилатного пластификатора.

Оптимальная дозировка САП зависит от его водоудерживающей способности и для большинства веществ находится в диапазоне 0,05–2 % от массы вяжущего. В настоящей работе дозировка полиакрилата натрия выбиралась по результатам предварительного эксперимента и составила 0,14–0,15 % от массы цемента.

Для повышения формоустойчивости и когезионной прочности бетонной смеси при 3D-печати, а также механических характеристик получаемого бетона рационально использование микрофибры. В исследуемых смесях (табл. 1) используется целлюлозная микрофибра, получаемая из отходов ЦБК. Кроме того, целлюлозная микрофибра обладает значительной водоудерживающей способностью [15], что потенциально должно способствовать механизму внутреннего ухода.

Микрокальцит, вводимый в количестве 17,4–18,6 %, выполняет роль микронаполнителя, улучшающего гранулометрию и плотность упаковки частиц [16]. Вместе с метакаолином, обладающим высокой пуццолановой активностью, он способствует снижению расхода цемента без потери эксплуатационных свойств и пластифицируемости смеси.

Исследуемые рецептуры (состав смеси, мас. %)

№ состава	0	1	2
Портландцемент	26,2	26,1	26,9
Метакаолин	3,04	3,04	3,24
Микрокальцит	17,4	17,4	18,6
Песок кварцевый	41,4	41,3	38,8
Целлюлозная микрофибра	-	0,18	0,20
Гиперпластификатор	0,13	0,13	0,14
САП (на сух. в-во)	-	0,039	0,041
Вода	11,8	11,8	12,1

Внутренний уход в полученном цементном композите реализуется следующим образом. Набухшие частицы САП, распределенные в цементной матрице, формируют, по сути, локальные водные резервуары. По мере расходования воды на гидратацию и испарение с поверхности в капиллярно-пористой структуре цементного камня активизируется десорбция влаги из САП, чем поддерживаются более благоприятные для твердения влажностные условия внутри материала в течение длительного времени. Целлюлозные волокна не только армируют цементный камень, но и сорбируют дополнительное количество воды за счет собственной гидрофильности, а затем также постепенно отдают ее в окружающие волокно микропоры цементного камня. Это сочетание двух компонентов способствует предотвращению трещинообразования цементной матрицы на всех этапах твердения за счёт минимизации пластической и влажностной составляющих усадки, и создает более благоприятные условия для формирования прочной структуры цементного камня даже на открытом воздухе.

Результаты исследования свойств бетонных смесей и затвердевшего бетона представлены в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Свойства цементных композитов (составы по табл.1)

Свойства	Показатели составов по свойствам		
	0	1	2
Пластическая прочность бетонной смеси, кПа	27	35	29
Формоустойчивость бетонной смеси при 3D-печати	6	9	6
Предел прочности при сжатии (через 1 сутки), МПа	34	28	30
Предел прочности при сжатии (через 28 суток), МПа	46	54	57
Предел прочности при изгибе (через 28 суток), МПа	3,9	5,8	6,0
Прочность адгезионного шва на отрыв, МПа	2,5	2,1	2,5
Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	2310	2250	2217
Удельный расход цемента, кг на 1 м <sup>3</sup>	588	586	596

Разработанные составы обладают приемлемой пластической прочностью и достаточной формоустойчивостью что соответствует требованиям большинства систем строительной трехмерной печати. Удельный расход цемента во всех составах находился в диапазоне 586–596 кг на кубический метр бетона, что является умеренным значением для мелкозернистых бетонов используемых в технологии 3D-печати [17]. На рис. 2 и 3 представлены экструдированные образцы цементных композитов.



Рис. 2. Образцы затвердевшего экструдированного материала:  
 а – контрольный состав (№ 0 по табл.1);  
 б – состав с добавлением САП и целлюлозного волокна (№ 3 по табл.1)



Рис.3. Мезоструктура дисперсно-армированного цементного композита  
 (поле изображения 10 мм) (состав № 3)

Анализ полученных данных показывает, что контрольный состав, твердевший в неблагоприятных условиях, демонстрирует прочность при сжатии 46 МПа в 28 суток и прочность при изгибе 3,9 МПа, что ниже значений, ожидаемых для материала нормального твердения. Введение суперабсорбирующего полимера совместно с целлюлозной микрофиброй (составы № 1 и № 2) позволило к 28 суткам повысить прочность при сжатии в 1,17–1,24 раза, а при изгибе – в 1,49–1,54 раза. Более выраженный прирост прочности при изгибе, по-видимому, связан не только с предотвращением высыхания материала благодаря внутреннему уходу, но и с непосредственным армирующим действием целлюлозных волокон. В составах с САП и целлюлозной микрофиброй менее выражены наружные дефекты, а структура композита и поверхность экструдированного материала остаётся сплошной.

Таким образом установлено, что совместное использование полиакрилата натрия и целлюлозной микрофибры позволяет целенаправленно управлять влажностными условиями твердения цементного композита, обеспечивая бездефектную структуру и повышенные физико-механические характеристики.

## Список литературы

1. Строительная 3D-печать в ожидании прорыва // *vc.ru*. – 2022. – URL: <https://vc.ru/u/744934-cvetnoy-mir/453219-stroitel'naya-3d-pechat-v-ozhidanii-proryva> (дата обращения: 31.05.2023).
2. Lowke, D. Particle-bed 3D printing in concrete construction—possibilities and challenges / D. Lowke, E. Dini, A. Perrot, D. Weger, C. Gehlen, B. Dillenburger // *Cement and Concrete Research*. – Elsevier, 2018. – Vol. 112. – P. 50–65.
3. Береговой, В.А. Цифровые технологии в исследовании механических свойств тонкослойных материалов / В.А. Береговой, С.А. Болдырев, И.Ю. Лавров // *Региональная архитектура и строительство*. – 2020. – № 4 (45). – С. 5–11.
4. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – Москва : АСВ, 2003. – 500 с.
5. Уткелбаева, А.О. Влияние температурного и влажностного факторов на структурообразование бетона / А.О. Уткелбаева // *Наука и техника Казахстана*. – Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, 2015. – № 1–2. – С. 117–124.
6. Руденко, Н.Н. Особенности ухода за дорожным цементобетоном в летний период строительства / Н.Н. Руденко, В.О. Доронина // *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. – 2009. – № 27. – С. 199–202.
7. Воробьев, А.А. Повышение качества бетонных работ в условиях сухого жаркого климата / А.А. Воробьев, В.И. Елфимов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. – 2005. – № 1. – С. 85–88.
8. Попов, Д.Ю. Влияние суперабсорбирующих полимеров на пластическую усадку цементного камня / Д.Ю. Попов, В.С. Лесовик, В.С. Мещерин // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. – 2016. – № 11. – С. 6–12.
9. Иноземцев, А.С. Использование раствора суперабсорбирующего полимера в цементных составах для 3D-печати / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев, Т.К. Зыонг, С.С. Иноземцев. – Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2023. – С. 19–29.
10. Resan, S. Developing self-curing cement sand mortar using sodium polyacrylate / S. Resan, S. Kamil, M. Abed // *Journal of Engineering and Sustainable Development*. – 2019. – Vol. 23. – P. 95–107.
11. Moayyad, Al-Nasra. Concrete Made For Energy Conservation Mixed With Sodium Polyacrylates / Moayyad Al-Nasra // *Int. Journal of Engineering Research and Application*. – 2013. – Vol. 3, № Issue 5. – P.601–604.
12. Королев, Е.В. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати / Е.В. Королев, К.З. Тхань, А.С. Иноземцев // *Вестник МГСУ*. – 2020. – Т. 15, № 6. – С. 834–846.
13. Manzur, T. Efficiency of sodium polyacrylate to improve durability of concrete under adverse curing condition / T. Manzur, S. Iffat, M.A. Noor // *Advances in Materials Science and Engineering*. – Hindawi, 2015. – Vol. 2015. – P. e685785.
14. Береговой, В.А. Исследование влияния суперабсорбирующих и минеральных добавок на поверхностное натяжение растворов гиперпластификаторов / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, И.С. Шурыгин // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. – 2022. – № 2 (15).
15. Новожилов, Е.В. Характеристика скопа, образующегося при локальной очистке волоконсодержащих сточных вод : 4 / Е.В. Новожилов, Д.Г. Чухчин, Е.В. Белых // *Химия растительного сырья*. – Барнаул : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет», 2014. – № 4. – С. 279–286.
16. Береговой, В.А. Высокофункциональные бетоны для станкостроения с применением нано- и микромасштабных сырьевых компонентов / В.А. Береговой,

---

Е.В. Снадин, А.С. Иноземцев, А.С. Пилипенко // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 200–210.

17. Славчева, Г.С. Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати : пат. RU2729085 С1 РФ / Славчева Г.С. – 2020. – С. 6.

## References

1. Construction 3D printing awaiting a breakthrough // vc.ru. – 2022. – URL: <https://vc.ru/u/744934-cvetnoy-mir/453219-stroitel'naya-3d-pechat-v-ozhidanii-proryva> (accessed: 31.05.2023).

2. Lowke, D. Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges / D. Lowke, E. Dini, A. Perrot, D. Weger, C. Gehlen, B. Dillenburger // *Cement and Concrete Research*. – Elsevier, 2018. – Vol. 112. – P. 50–65.

3. Beregovoy, V.A. Digital technologies in the study of mechanical properties of thin-layer materials / V.A. Beregovoy, S.A. Boldyrev, I.Yu. Lavrov // *Regional Architecture and Engineering*. – 2020. – No. 4 (45). P. 5–11.

4. Bazhenov, Yu.M. *Concrete Technology* / Yu.M. Bazhenov. – Moscow : ASV Publ., 2003. – 500 p.

5. Utkelbaeva, A.O. Influence of temperature and humidity factors on the structure formation of concrete / A.O. Utkelbaeva // *Science and Technology of Kazakhstan*. – Pavlodar State University named after S. Toraighyrov, 2015. – No. 1–2. – P. 117–124.

6. Rudenko, N.N. Features of curing of road cement concrete during the summer construction period / N.N. Rudenko, V.O. Doronina // *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. – 2009. – No. 27. – P. 199–202.

7. Vorobiev, A.A. Improving the quality of concrete works in dry hot climate conditions / A.A. Vorobiev, V.I. Elfimov // *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. – 2005. – No. 1. – P. 85–88.

8. Popov, D.Yu. Influence of superabsorbent polymers on plastic shrinkage of cement stone / D.Yu. Popov, V.S. Lesovik, V.S. Mescherin // *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. – 2016. – No. 11. – P. 6–12.

9. Inozemtsev, A.S. Use of superabsorbent polymer solution in cement compositions for 3D printing / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev, T.K. Zyong, S.S. Inozemtsev. – Immanuel Kant Baltic Federal University, 2023. – P. 19–29.

10. Resan, S. Developing self-curing cement sand mortar using sodium polyacrylate / S. Resan, S. Kamil, M. Abed // *Journal of Engineering and Sustainable Development*. – 2019. – Vol. 23. – P. 95–107.

11. Moayyad, Al-Nasra. Concrete made for energy conservation mixed with sodium polyacrylates / Moayyad Al-Nasra // *International Journal of Engineering Research and Applications*. – 2013. – Vol. 3, Issue 5. – P. 601–604.

12. Korolev, E.V. Method for providing internal curing of cement hydration in compositions for 3D printing / E.V. Korolev, K.Z. Thanh, A.S. Inozemtsev // *Vestnik MGSU (Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering)*. – 2020. – Vol. 15, No. 6. – P. 834–846.

13. Manzur, T. Efficiency of sodium polyacrylate to improve durability of concrete under adverse curing condition / T. Manzur, S. Iffat, M.A. Noor // *Advances in Materials Science and Engineering*. – Hindawi, 2015. – Vol. 2015. – P. e685785.

14. Beregovoy, V.A.. Investigation of the influence of superabsorbent and mineral additives on the surface tension of hyperplasticizer solutions / V.A., Beregovoy I.Yu. Lavrov, I.S. Shurygin // *Bulletin of PGUAS: Construction, Science and Education*. – 2022. – No. 2 (15).

15. Novozhilov, E.V. Characteristics of scum formed during local treatment of fiber-containing wastewater : 4 / E.V. Novozhilov, D.G. Chukhchin, E.V. Belykh // *Chemistry of Plant Raw Material*. – Russia, Barnaul: Altai State University, 2014. – No. 4. – P. 279–286.

---

16. Beregovoy, V.A. High-functional concretes for machine tool construction using nano- and microscale raw materials / V.A. Beregovoy, E.V. Snadin, A.S. Inozemtsev, A.S. Pilipenko // *Nanotechnologies in Construction : Scientific Internet Journal*. – 2023. – Vol. 15, No. 3. – P. 200–210.

17. Slavcheva, G.S. Two-phase cement-based mixture for composites in construction 3D printing technology : Patent RU2729085 C1 RF / Slavcheva G.S. – 2020. – P. 6.

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

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

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ БОЛТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.О. Мартышкин, И.В. Залилов, М.В. Арискин

Рассматривается применение стеклопластиковых болтов в соединениях деревянных конструкций. Представляются болты с различными диаметрами и процентом армирования. Представляются результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки. Устанавливается зависимость величины несущей способности от геометрических параметров и процента армирования.

*Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, стеклопластиковый болт, стеклопластиковая гайка, несущая способность, критерий разрушения, смола, отвердитель, процент армирования*

## BEARING CAPACITY OF FIBERGLASS BOLTS WITH DIFFERENT PARAMETERS OF WOODEN STRUCTURES CONNECTIONS

D.O. Martyshkin, I.V. Zalilov, M.V. Ariskin

The application of fiberglass plastic bolts in wooden structures connections is considered. Bolts with various diameters and reinforcement ratios are presented. The results of samples testing under short-term load are presented. The correlation of the geometric parameters and reinforcement ratio at bearing capacity is established.

*Keywords: wooden structures, connection, fiberglass bolt, fiberglass nut, bearing capacity, criterion of destruction, resin, hardener, reinforcement ratio*

### Введение

Цельная и клееная древесина широко применяется в строительстве большепролетных зданий и сооружений, а также в частном и многоэтажном строительстве [1]. Древесина обладает высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред, в связи с чем деревянные несущие конструкции получили широкое распространение на

объектах с высокой влажностью и агрессивными средами (склады химических удобрений, объекты сельхозназначения и т.п.).

Использование композитов в узлах деревянных конструкций исключает металл из узлов, что позволяет повысить коррозионную стойкость и долговечность конструкций, снизить затраты на обслуживание конструкций [2].

Однако большинство композитных решений узлов деревянных конструкций предполагает вклеивание стекло- и углепластиковых нагелей [3–5], что ограничивает разборность конструкции.

Были выполнены натурные испытания [6] стеклопластиковых стрижней на срез, которые позволили выявить рациональность создания стеклопластиковых шпилек на основе композитной арматуры. Далее на основе натурных испытаний на срез [7] установлена удовлетворительная несущая способность стеклопластиковых шпилек/болтов, которая составила 25,47 кН, что подтвердило их практическую применимость в деревянных конструкциях для обеспечения коррозионной стойкости, немагнитности и радиопрозрачности узла. Таким образом, подтверждена практическая применимость болтов из эпоксидной смолы с резьбой.

#### **Методика проведения испытаний стеклопластиковых шпилек**

Для выявления зависимостей несущей способности болтов были приняты следующие диаметры заготовок  $D_6$ : 16 мм, 18 мм и 20 мм. В качестве материалов для стеклопластикового болта приняты смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) и стеклопластиковая арматура (ГОСТ 31938-2012), в качестве отвердителя использовался Этал-45М. Пропорция для смешивания с эпоксидной смолой на 100 в.ч смолы нужно 50 в.ч отвердителя по массе. В отличие от заготовок, которые рассматривались в [7], в эпоксидную смолу добавлялось в качестве заполнителя рубленое стекловолокно длиной 3 мм для снижения трещинообразования и скалывания оболочки. Диаметры стеклопластиковой арматуры принимались 12 мм, 14 мм и 16 мм для болтов 16 мм, 18 мм и 20 мм соответственно. Исходя из условий ручного способа замешивания смолы и требований к удобоукладываемости смеси были приняты следующие проценты армирования по массе: 15 %, 25 % и 35 % – для выявления их влияния на несущую способность элементов. При 35 % была отмечена высокая вязкость состава, весьма затруднена подача в форму.

Болты изготавливались в лаборатории кафедры «Строительные конструкции» ПГУАС. Заливка стеклопластиковой арматуры выполнялась в пластиковой опалубке [6]. Общий вид стеклопластиковых заготовок для болтов показан на рис. 1.

Образцы испытывались на срез по схеме, при которой нагружение производилось через металлические накладки, передающие усилия на стеклопластиковый стержень по аналогии с ранее проведенными испытаниями [6, 7] (рис. 2).

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 [6]. Передача нагрузки на образцы осуществлялась непрерывно со скоростью нагружения 3 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.

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 образцов до 5 кН производится автоматическая тарировка прессы, при которой перемещения незначительны (либо равны 0, либо близки к этому значению). Все это объясняется технологической особенностью прессы.

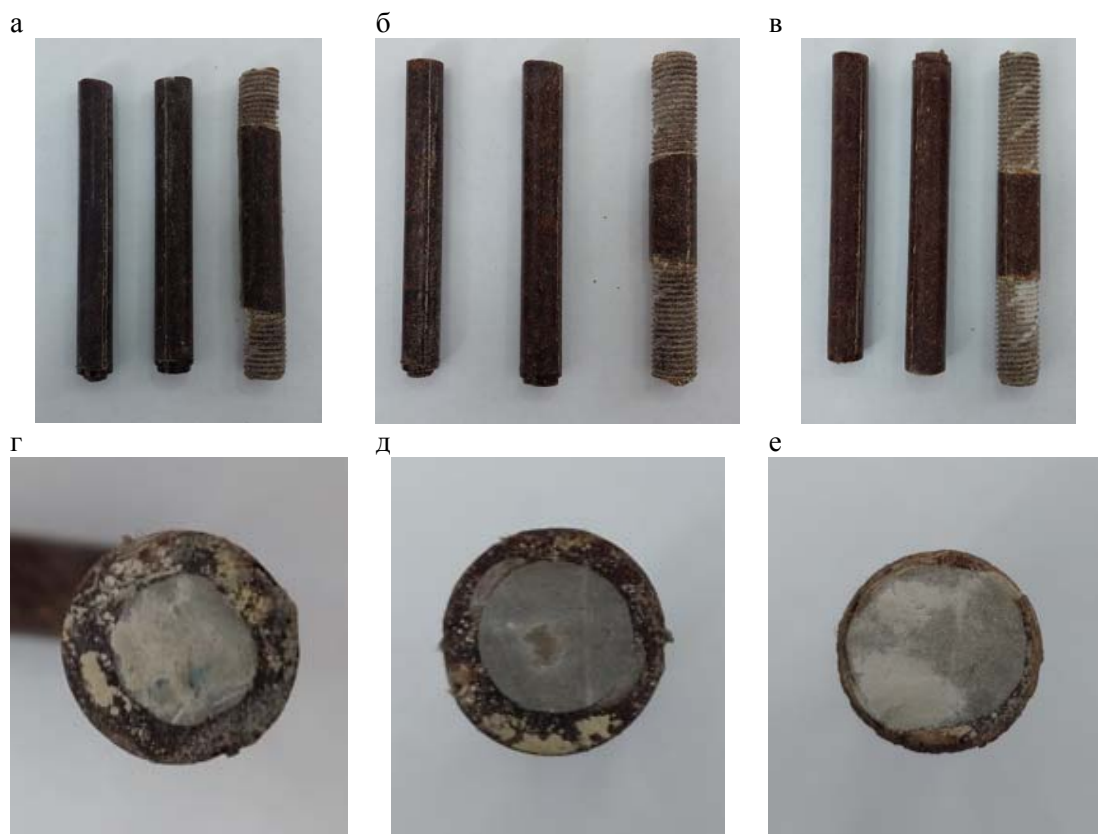


Рис. 1. Общий вид стеклопластиковых заготовок для болтов:  
 а – образцы с армированием 15 %; б – образцы с армированием 25 %;  
 в – образцы с армированием 15 %; г, д, е – сечения образцов



Рис. 2. Испытание образцов на гидравлическом прессе П-500

### Результаты испытаний

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки приведены в таблице, графики нарастания деформаций сдвига представлены на рис. 3.

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки

Марка образца	Диаметр образца $D$ , мм	Арматурный стержень, мм	Процент армирования оболочки	Скорость нагружения, кН/мин	Разрушающая нагрузка $P_{разр}$ , кН
Бр-2.1	16	12	15	3	26,06
Бр-2.2			25		30,43
Бр-2.3			35		26,06
Бр-2.4	18	14	15		37,50
Бр-2.5			25		31,97
Бр-2.6			35		40,94
Бр-2.7	20	16	15		74,63
Бр-2.8			25		72,48
Бр-2.9			35		78,64

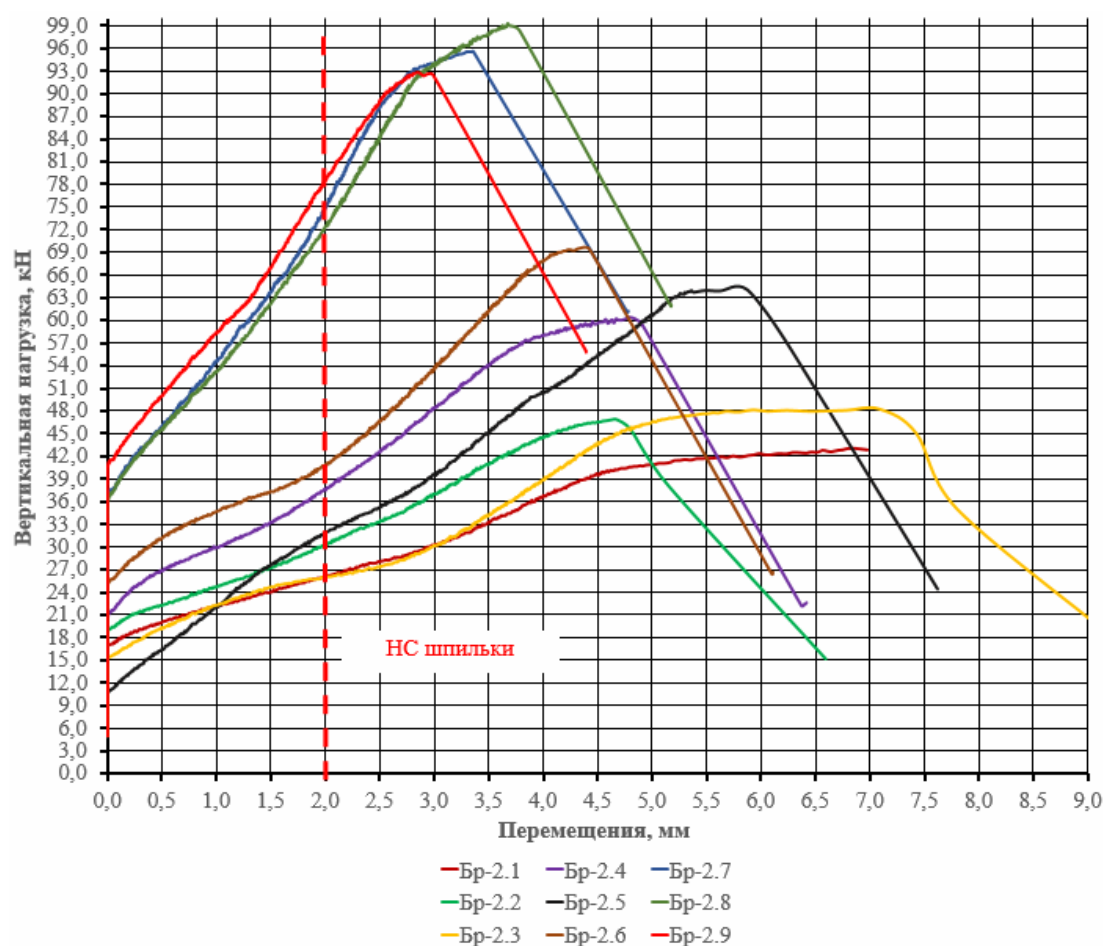


Рис. 3. Деформации сдвига стеклопластиковых шпилек

В табл. 1 представлена разрушающая нагрузка  $P_{разр}$  образцов. Графики имеют достаточно выраженные линейные зависимости (упругая работа), переходящие в зону пластических деформаций, после которой следует разрушение стержня болта.

Несущую способность болта возрастает при увеличении диаметра образцов. Увеличение процента армирования оболочки не влияет явным образом на несущую способность образца, однако смятие шпилек практически не сопровождается растре-

свиванием наружного слоя смолы, характер разрушения изменяется от более хрупкого [6, 7] к более пластичному; общий вид разрушения представлен на рис.4.

За разрушающую нагрузку (несущую способность) принимается величина, соответствующая деформациям сдвига, равным 2,0 мм.



Рис. 4. Общий вид разрушения образцов с различным процентом армирования:  
а – 15 %; б – 25 %; в – 35 %

#### **Изготовление неметаллического болтового комплекта**

Для полного исключения металла из узла были изготовлены пробные образцы гаек. Литье осуществлялось в опалубку, напечатанную на 3D-принтере из гибкого термополиуретана и смазанную разделителем для эпоксидных смол.

После извлечения гаек из опалубки метчиком создавалась резьба. Отмечена склонность гаек без армирования к образованию трещин и резкому разрушению, в последующем добавлялись стекловолокна в виде направленных нитей, концентричных отверстию, для восприятия основных нагрузок, а также в виде рубленого стекловолокна для заполнения массива смолы (10 % от массы).

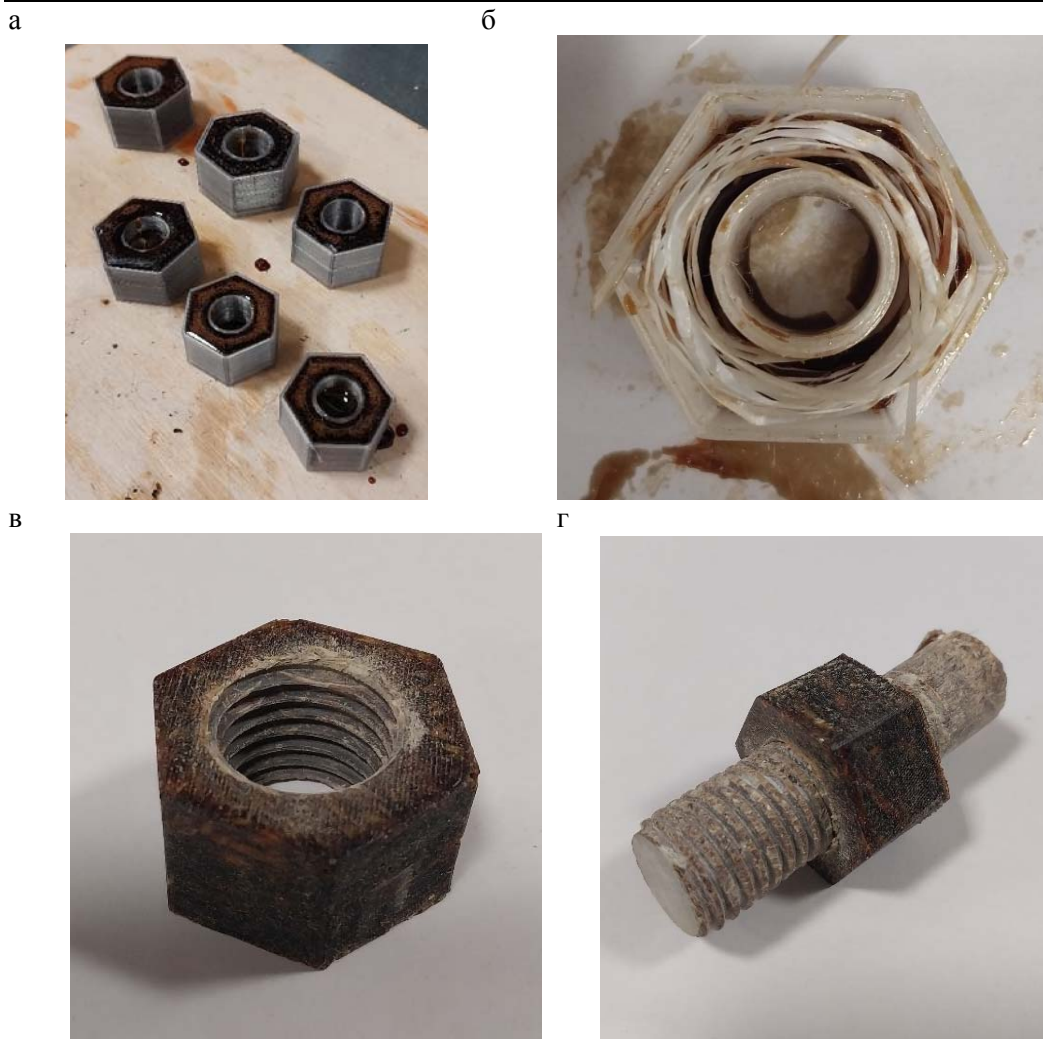


Рис. 5. Создание гаек:  
 а – процесс заливки гаек; б – укладка армирования;  
 в – общий вид готовой гайки; г – композитная пара шпилька – гайка

### Выводы

1. На основании натуральных испытаний стеклопластиковых шпилек/болтов на срез установлен факт повышения их несущей способности при увеличении диаметра образцов.
2. Отмечена тенденция роста несущей способности образца с увеличением процента армирования эпоксидной оболочки рубленым стекловолокном. Для выявления влияния процента армирования оболочки на несущую способность данных болтов необходимо провести более глубокое исследование.
3. Предложен способ создания стеклопластиковых гаек, исключаящий использование металла в узлах.

### 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. Водяников, М.А. Несущая способность и деформативность углепластиковых нагельных соединений деревянных конструкций, работающих в агрессивной среде : автореферат / М.А. Водяников. – Москва, 2020. – 23 с.

---

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Арискин, М.В. Несущая способность стеклопластиковых болтов соединений деревянных конструкций / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин, И.В. Залилов // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63) – С. 143–149.

## References

1. Koklyugina, L.A. Modern technologies for the construction of multi-storey wooden houses / L.A. Koklyagina, 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. Vodyannikov, M.A. Bearing capacity and Deformability of carbon fiber nails joints of wooden structures operating in an aggressive environment : abstract of thesis / M.A. Vodyannikov. – Moscow, 2020. – P. 23.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Ariskin, M.V. Bearing capacity of fiberglass bolts connecting wooden structures / M.V. Ariskin, I.V. Zalilov // Regional architecture and engineering – 2025. – No 2 (63). – P. 143–149.

*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

**Меркушов Антон Викторович,**  
аспирант кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: merkushov.av@mail.ru

**Викторов Валерий Васильевич,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: vvvictorov-do@yandex.ru

**Шибает Александр Викторович,**  
аспирант кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: shibaev-83@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

**Merkushov Anton Viktorovich,**  
Postgraduate of the department «Building Structures»  
E-mail: merkushov.av@mail.ru

**Viktorov Valery Vasilyevich,**  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Building Structures»  
E-mail: vvvictorov-do@yandex.ru

**Shibaev Aleksander Viktorovich,**  
Postgraduate of the department «Building Structures»  
E-mail: shibaev-83@mail.ru

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТРОПИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ ЗАДАНИЯ ВРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК

Д.О. Мартышкин, А.В. Меркушов, В.В. Викторов, А.В. Шибает

Рассмотрены несущие элементы деревянной стропильной системы. Описана методика расчета деревянной стропильной системы с учетом моделирования различных вариантов снеговой и ветровой нагрузок. Представлены результаты моделирования и расчета конструкций деревянной кровли здания для анализа напряженно-деформированного состояния несущих элементов. Рассмотрены перемещения и усилия в элементах по расчетным сочетаниям усилий, постоянные и временные нагрузки. Проверка наиболее нагруженных конструктивных элементов и узлов кровли подтвердила прочность и устойчивость сечений несущих конструкций стропильной системы при действии постоянных и временных нагрузок.

*Ключевые слова: деревянные конструкции, напряженно-деформированное состояние, стропильная система, постоянные и временные нагрузки, расчетная схема*

## STRESS-STRAIN STATE OF WOODEN LOAD-BEARING STRUCTURES OF A RAFTER SYSTEM WITH VARIOUS OPTIONS FOR SETTING TEMPORARY LOADS

D.O. Martyshkin, A.V. Merkushov, V.V. Viktorov, A.V. Shibaev

The load-bearing elements of a wooden rafter system are considered. A method for calculating a wooden rafter system is presented, taking into account the modeling of various variants of snow and wind loads. The results of modeling and calculation of the wooden roof structures of a building for the analysis of the stress-strain state of load-bearing elements are presented. Displacements and forces in the elements are considered according to calculated combinations of forces, permanent and

temporary loads. The inspection of the most loaded structural elements and roof assemblies confirmed the strength and stability of the cross-sections of the supporting structures of the rafter system under the action of permanent and temporary loads.

*Keywords: wooden structures, stress-strain state, rafter system, permanent and temporary loads, design scheme*

В современной практике строительства наиболее распространёнными являются железобетонные и металлические конструкции, которые позволяют возводить многоэтажные большепролетные здания и сооружения. Деревянные конструкции используются в объектах с агрессивной внутренней средой (бассейны, предприятия химической промышленности) [1-3]. Также деревянные конструкции применяются при реставрации и реконструкции зданий [1-4]. Как правило, при реконструкции и реставрации древесина используется в несущих элементах стен, перегородок, перекрытий, стропильной системы покрытия. Однако принятые конструктивные решения реконструируемых зданий не соответствуют актуальным нормам. На этом основании необходимо выполнить моделирование и расчет рассматриваемых конструкций на соответствие актуальным нормам проектирования, а также проектные работы нового здания с соблюдением исходных габаритов здания, кровли, элементов отделки и др.

Далее рассматриваются моделирование и расчет деревянных несущих конструкций стропильной системы с различными вариантами задания временных нагрузок.

Расчёт выполнялся для несущих конструкций объекта культурного наследия регионального значения», расположенного в г. Пензе (Пензенская область, Российская Федерация).

Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», район строительства относится к III снеговому району с нормативным значением снеговой нагрузки  $S_g=150 \text{ кг/м}^2$  и ко II ветровому району с нормативным значением ветрового давления  $w_0=30 \text{ кг/м}^2=0,30 \text{ кПа}$ . Величины нагрузок, а также коэффициенты надежности по нагрузке приняты в соответствии со СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Пространственная модель расчетной схемы здания представлена на рис. 1.

Основной каркас здания изготавливается из монолитного железобетона (фундаментная плита, стены, пилоны, колонны, плиты и балки перекрытия/покрытия). Кровля скатная с деревянной стропильной системой (мауэрлат, стопила, раскосы, стойки, затяжки) выполняется из досок и брусьев.

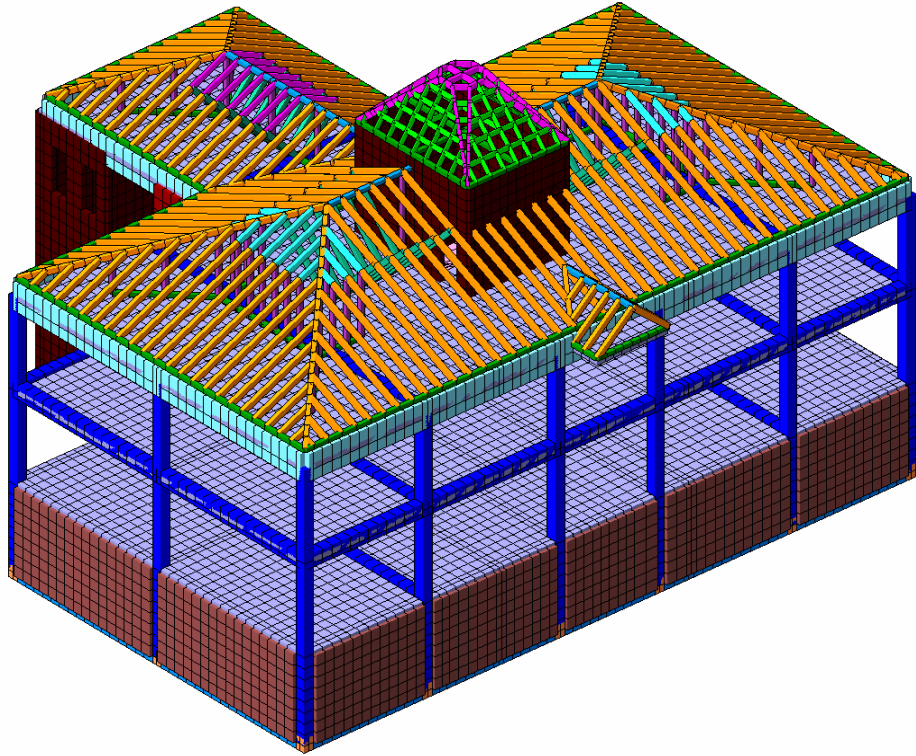
Моделирование и расчет здания производятся методом конечных элементов (МКЭ) с моделированием пластинчатых элементов (плиты, стены), стержневых элементов (колонны, балки, элементы стропильной системы кровли), упругого основания, заданием постоянных и временных нагрузок в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». На первом этапе производится расчет железобетонного каркаса совместно с кровлей для анализа деформаций и напряженно-деформированного состояния здания в целом (рис. 1, а). После чего железобетонный каркас исключается из расчетной схемы (РС), накладываются связи, и выполняется расчет элементов основной кровли и «кукушки» (рис. 1, б, в).

На основную кровлю и «кукушку» действуют постоянные (собственный вес, покрытие кровли) и временные (снеговая и ветровая) нагрузки.

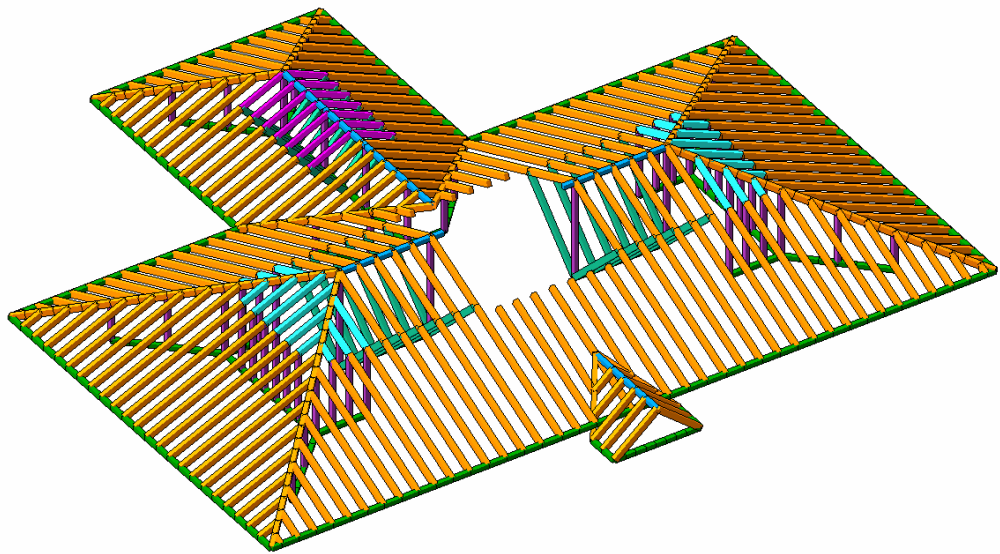
Классическая методика задания снеговой нагрузки на скатную кровлю по прил. Б.1, Б.3 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» не подходит ввиду наличия большого числа скатов в ортогональных плоскостях, снеговых мешков в участках с превышением высот кровли и ендов. На этом основании ниже рассмотрены различные варианты снеговых нагрузок на кровлю здания (вариант 1-3).

Снеговая нагрузка приложена на элементы стропильной системы покрытия в виде погонной нагрузки в кН/м ( $b=0,6 \text{ м}$  – шаг стропильных ног кровли) по внешнему контуру здания. Загружение скатной кровли выполнено нагружением всей кровли (основной и «кукушки») с расчетным значением  $2,1 \text{ кН/м}^2$  (вариант 1.1) и отдельными участками – вариант 1.2.1-1.2.7 (рис. 2).

a



б



в

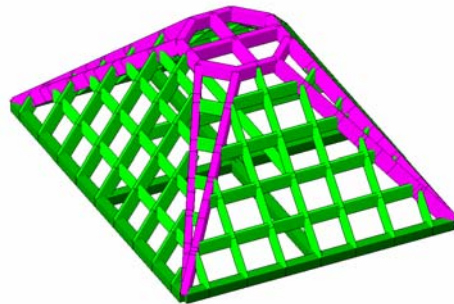


Рис. 1. Пространственная модель расчетной схемы здания (а), основной кровли (б), «кукушки» (в)

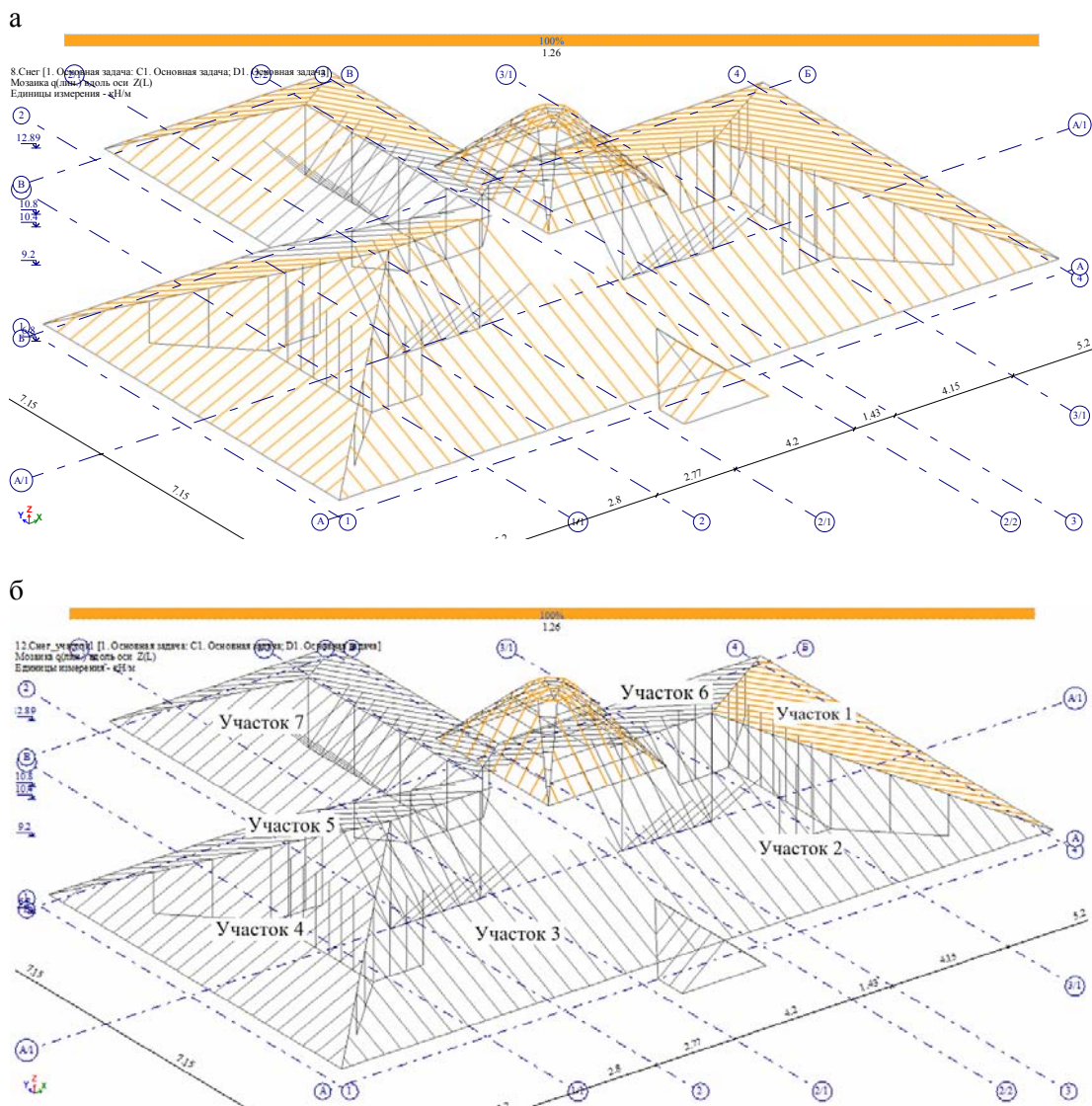


Рис. 2. Варианты задания снеговой нагрузки на кровлю здания:

- а – с расчетным значением распределенной нагрузки по всей кровли (вариант 1.1);
- б – с расчетным значением распределенной нагрузки по скатным участкам кровли (варианты 1.2.1-1.2.7)

В соответствии со схемой нагружения кровли снеговой нагрузкой по приложению Б.3 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» как кровли с продольными фонарями, снеговой мешок находится в уровне мезонина. Данное нагружение представлено в виде двух нагрузок: «снег слева» (вариант 2.1), «снег справа» (вариант 2.2) (рис. 3).

Нагрузка от снегового мешка в ендове по оси Б в осях 2-3. Расчет выполнен по приложению Б СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» как для участка с одним перепадом высоты по рис. Б.11б – вариант 3.1 (рис. 4).

Ветровая нагрузка на основную кровлю и «кукушку» приложена к стержневым элементам кровли как равномерно распределённая (кН/м), грузовая ширина принята равной шагу стропильных ног кровли ( $b=0,6$  м) в соответствии с приложением В1.2 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» для прямоугольных зданий с двухскатным покрытием: «ветер слева», «ветер справа», «ветер спереди» (вариант 1), «ветер спереди» (вариант 2), «ветер сзади» (вариант 1), «ветер сзади» (вариант 2) (рис. 5-6).

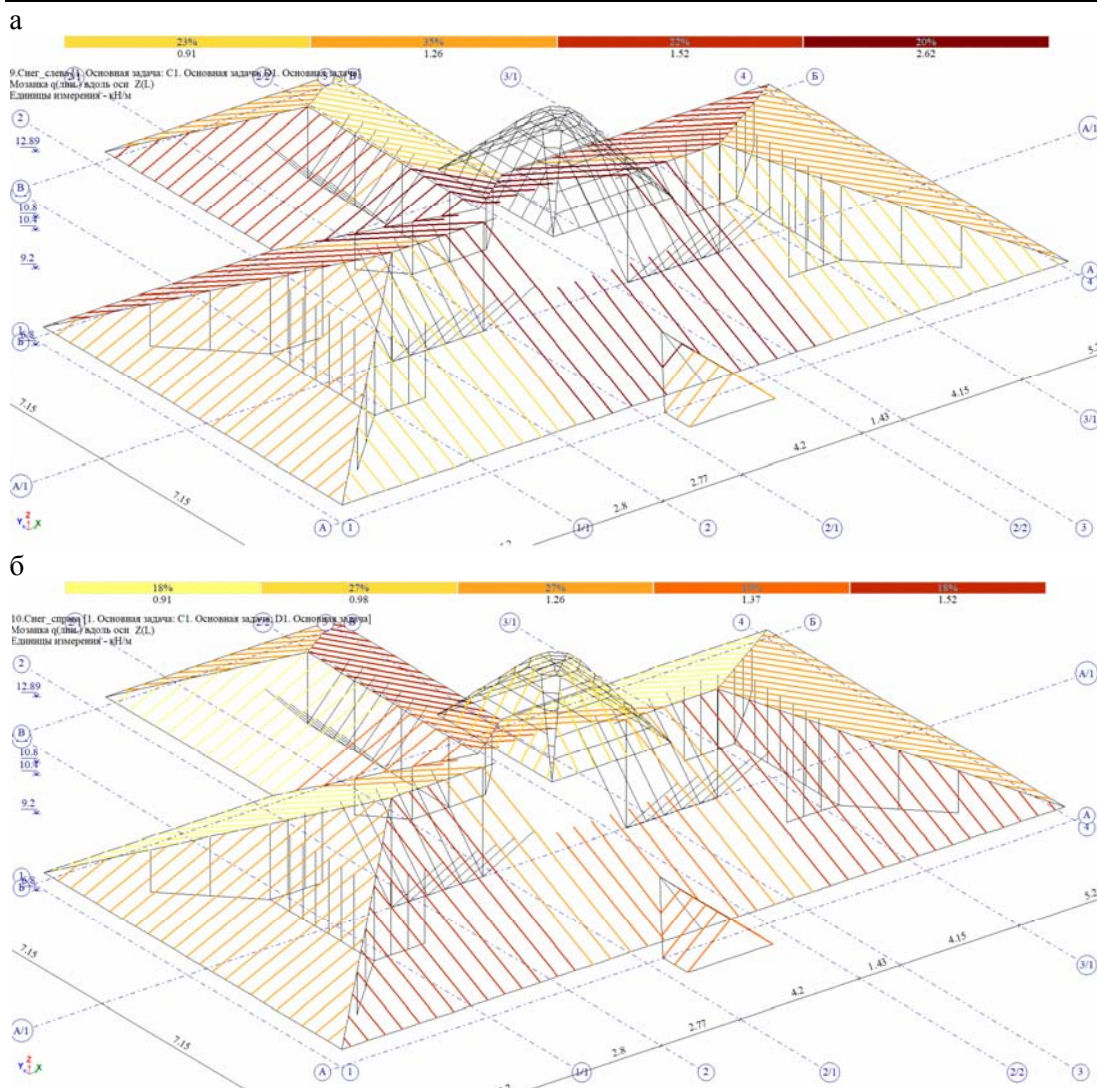


Рис. 3. Нагрузка от снегового мешка в уровне мезонина:  
а – снег слева (вариант 2.1); б – снег справа (вариант 2.2)

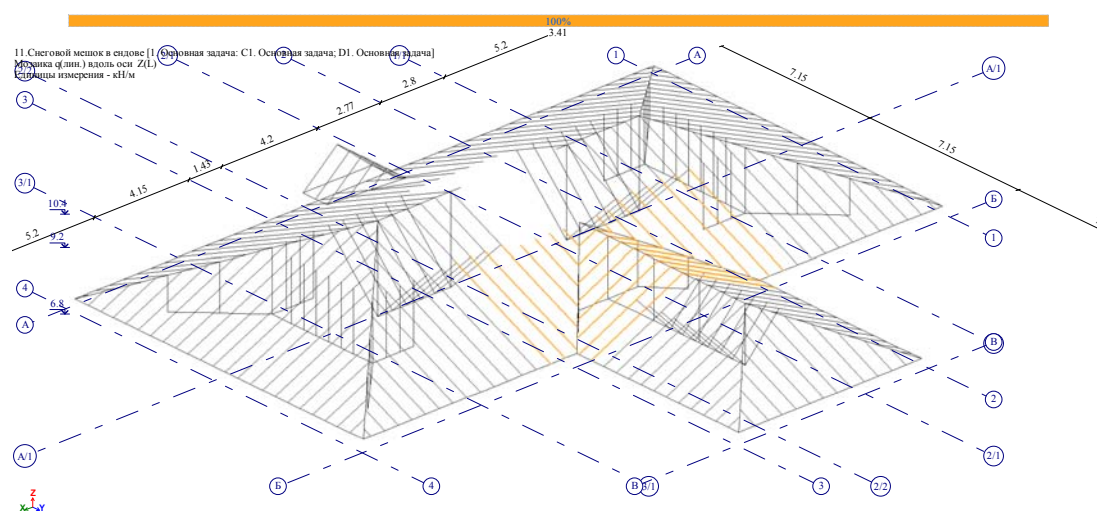


Рис. 4. Нагрузка от снегового мешка в ендове основной кровли по оси Б  
в осях 2-3 (вариант 3.1)

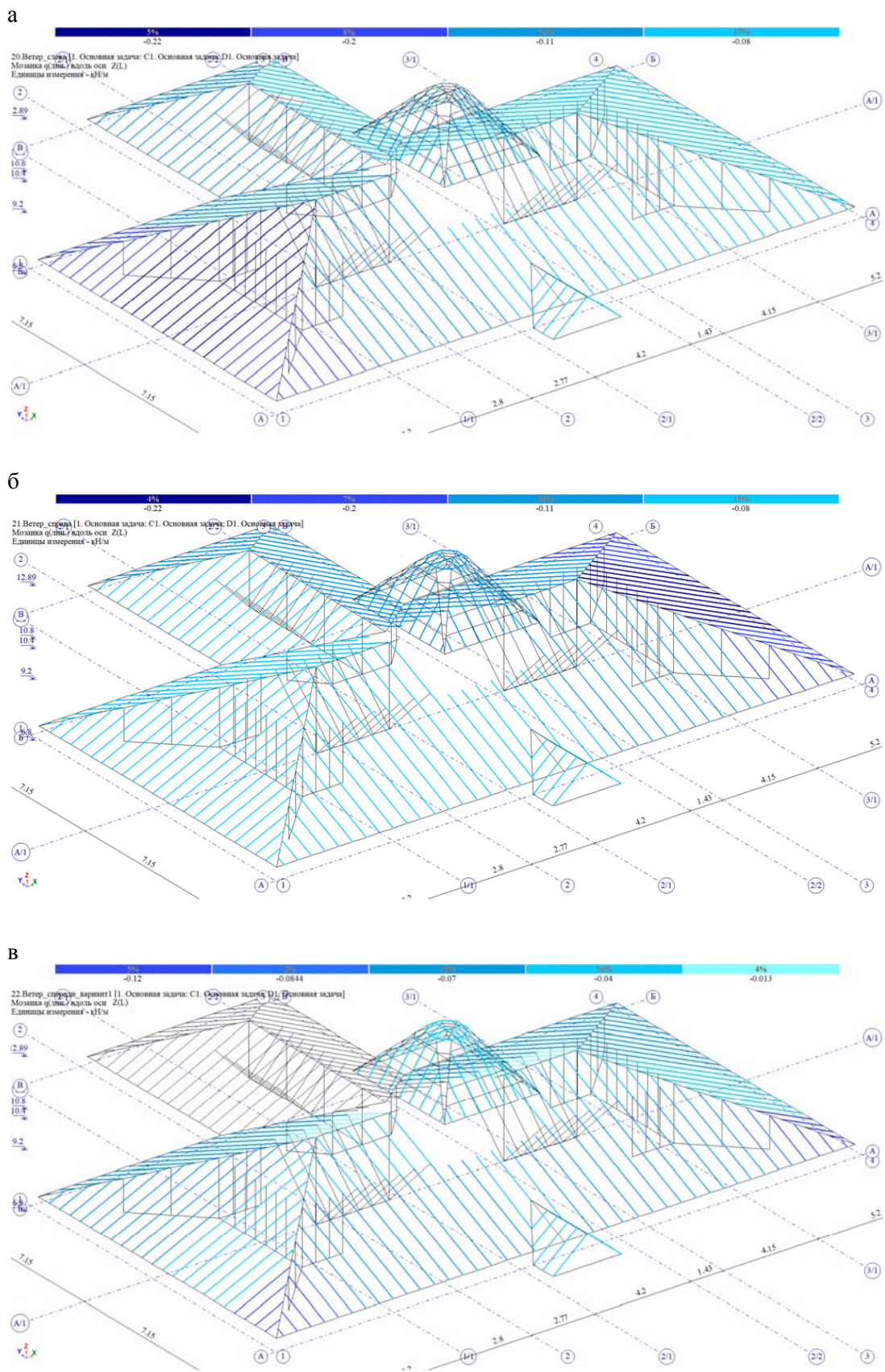


Рис. 5. Нагрузки на скатную кровлю здания:  
 а – «ветер слева»; б – «ветер справа»; в – «ветер спереди» (вариант 1)

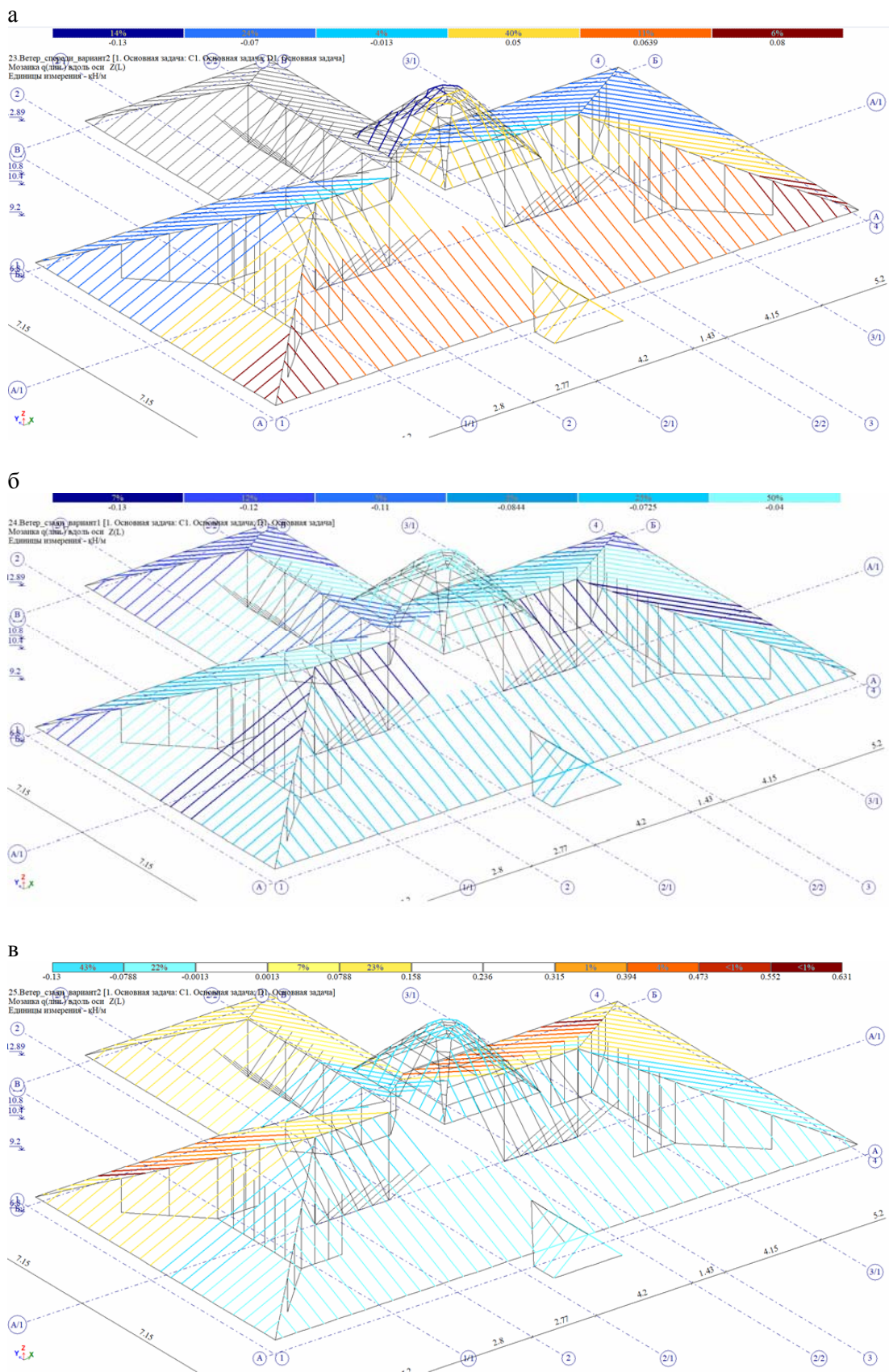


Рис. 6. Нагрузки на скатную кровлю здания:  
 а – «ветер спереди» (вариант 2); б – «ветер сзади» (вариант 1); в – «ветер сзади» (вариант 2)

На основе расчётных сочетаний нагрузок учитываются комбинации расчетных величин: собственный вес+покрытие кровли; собственный вес+покрытие кровли+варианты снеговой нагрузки (вариант 1-3); собственный вес+покрытие кровли+варианты снеговой нагрузки (вариант 1-3)+варианты ветровой нагрузки на кровлю. По результатам расчета получены мозаики перемещений (рис. 7).

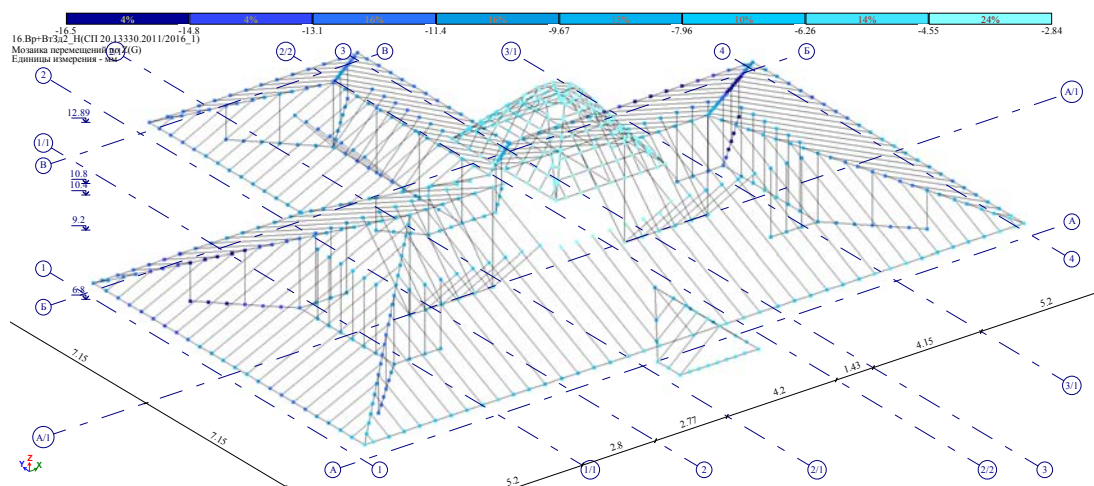


Рис. 7. Мозаика вертикальных перемещений по оси Z основной кровли и «кукушки»

Максимальные вертикальные перемещения основной кровли и «кукушки» здания не превышают предельно допустимых в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Далее представлены мозаики усилий  $N$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  в несущих стержневых элементах основной кровли и «кукушки» (рис. 8).

На основании результатов расчета перемещений по оси Z и величин усилий в стержневых элементах кровли принимаются наиболее нагруженные элементы для проверки прочности сечения (рис. 9).

Наиболее нагруженные элементы рассчитываются по прочности сечения деревянной балки в соответствии с СП 64.13330.2017 «СНиП П-25-80 Деревянные конструкции». Расчеты подтвердили прочность наиболее нагруженных узлов элементов деревянной кровли. Выполненные расчеты наиболее нагруженных элементов и узлов деревянной кровли (коньковый узел стропильных ног, узел соединения стропильных ног с раскосом, узел в месте стыка стропильной ноги с мауэрлатом) подтвердили их прочность. На основании результатов расчета основной кровли и «кукушки» установлено, что прочность и устойчивость несущих элементов обеспечена.

Таким образом, несущие деревянные конструкции используются в объектах с агрессивной средой, а также при реконструкции и реставрации зданий и сооружений. Представленная методика расчета деревянной стропильной системы с учетом моделирования различных вариантов снеговой и ветровой нагрузок подтвердила прочность и устойчивость сечений несущих конструкций стропильной системы.

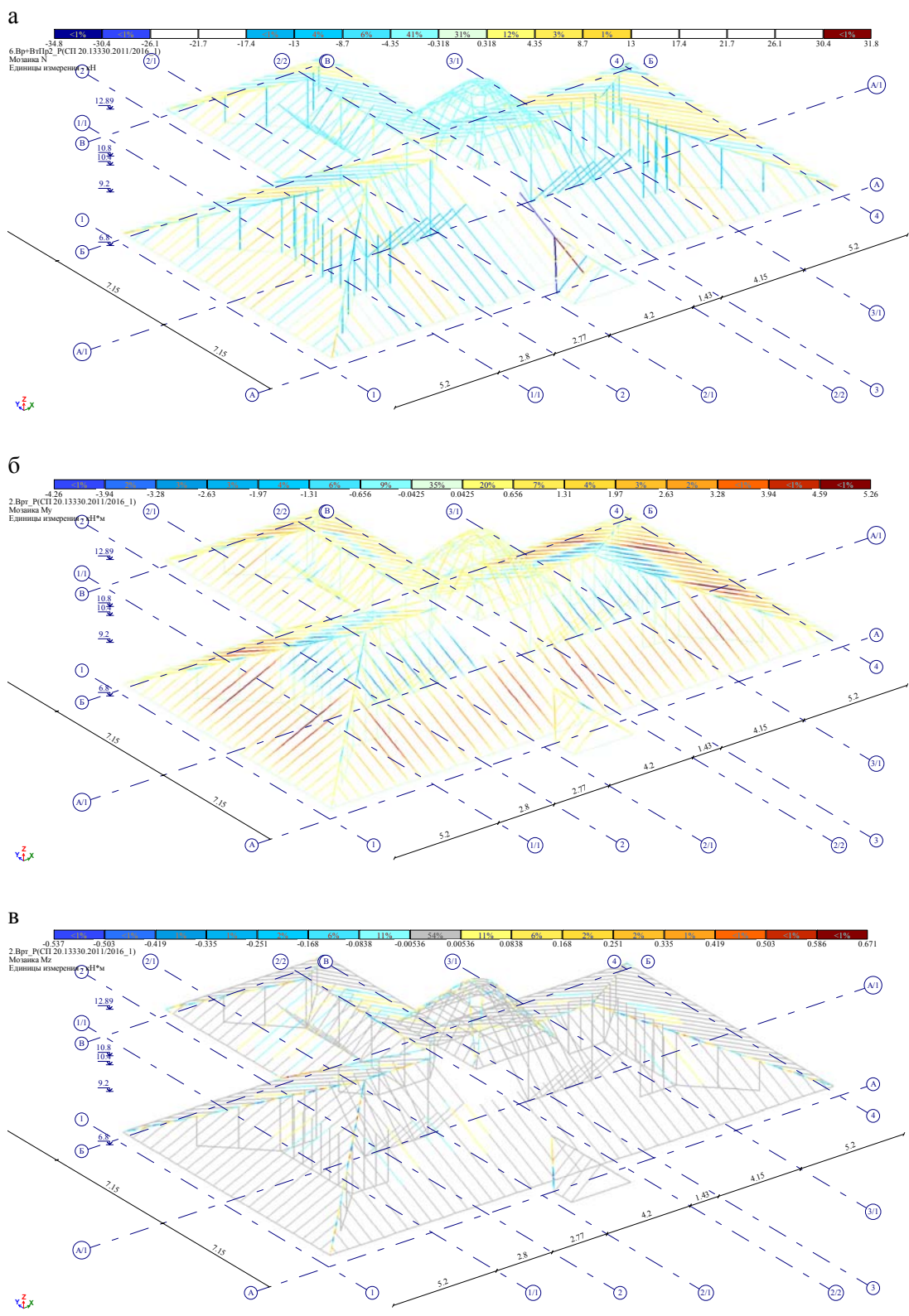


Рис. 8. Мозаики усилий  $N$  (а),  $M_y$  (б),  $M_z$  (в) в несущих стержневых элементах основной кровли и «кукушки»

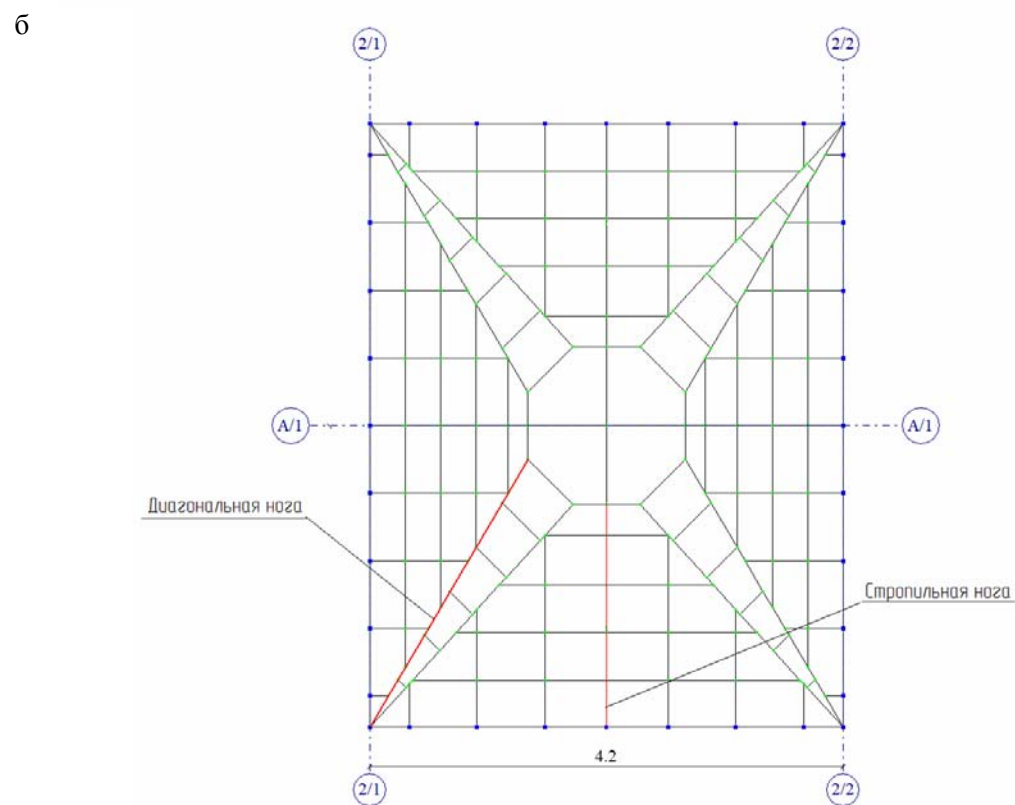
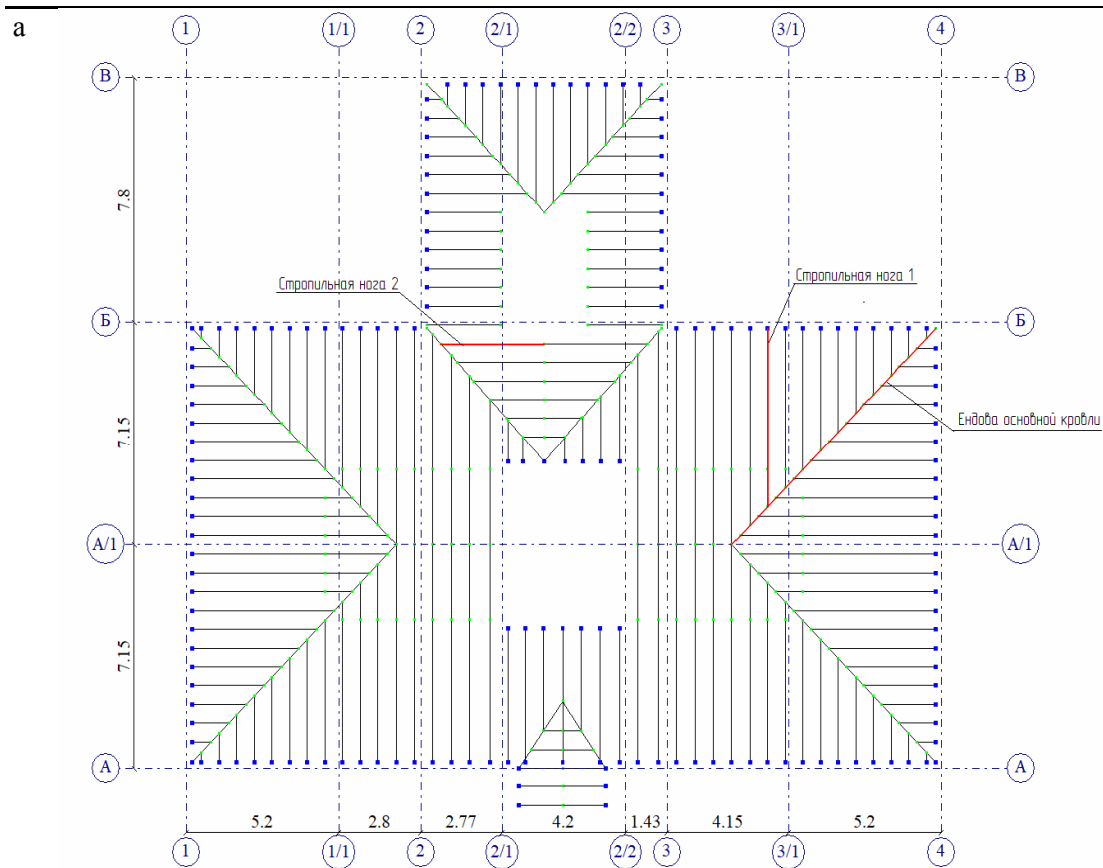


Рис. 9. Наиболее нагруженные элементы основной кровли (а) и «кукушки» (б)

---

## Список литературы

1. Гаппоев, М.М. Конструкции из дерева и пластмасс / М.М. Гаппоев, И.М. Гуськов, Л.К. Ермоленко, В.И. Линьков, Е.Т. Серова, Б.А. Степанов, Э.В. Филимонов. – Москва : АСВ, 2004. – 440 с.
2. Калугин, А.В. Деревянные конструкции / А.В. Калугин. – Москва : АСВ, 2008. – 286 с.
3. Сибен, А.В. Клеёные деревянные конструкции в строительстве: эффективность и проблемы применения / А.В. Сибен // Новые технологии – нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в IV томах. – Тюмень, 2022. – С. 180–183.
4. Скворцова, В.С. Конструктивные решения, применимые для реставрации деревянных хозяйственных построек, на примере лавки купцов Глухаревых в г. Переславле-Залесском / В.С. Скворцова, А.Ю. Ушаков. – DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.3. // Строительство: наука и образование. – 2025. – Т. 15, вып. 2, ст. 3. – URL: <http://nso-journal.ru>.
5. Pryadko, I. Wood as a Material of Traditional Manor Building: Problems of Restoration, Conservation and Reconstruction / I. Pryadko, I. Lebedev. – DOI: 10.1088/1757-899x/1079/3/032022 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079, Issue 3. – P. 032022. – EDN DLEATZ.
6. Бульбович, Р.В. Расчет напряженно-деформированного состояния тела из упругого ортотропного материала с помощью метода конечных элементов / Р.В. Бульбович, В.В. Павлоградский, П.П. Еременко. – DOI: 10.15593/2224-9982/2015.40.06 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 40. – С. 92–105. – EDN TMJGMV.

## References

1. Gappoev, M.M. Constructions from wood and plastics / M.M. Gappoev, I.M. Guskov, L.K. Ermolenko, V.I. Linkov, E.T. Serova, B.A. Stepanov, E.V. Filimonov. – Moscow : ASV Publishing House, 2004. – P 440.
2. Kalugin, A.V. Wooden constructions / A.V. Kalugin. – Moscow: ASV Publishing House, 2008. – P. 286.
3. Siben, A.V. Glued wooden structures in construction: efficiency and application problems / A.V. Siben // New technologies for the oil and gas region :. Materials of the International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and Young Scientists. In IV volumes. – Tyumen, 2022. – P. 180–183.
4. Skvortsova, V.S. Constructive solutions applicable for restoration of wooden household buildings on the example of the shop of the Glukharev merchants in Pereslavl-Zalesky / V.S. Skvortsova, A.Yu. Ushakov. – DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.3 // Construction: Science and Education. – 2025. – 15(2):3. – URL: <http://nso-journal.ru>.
5. Pryadko, I. Wood as a Material of Traditional Manor Building: Problems of Restoration, Conservation and Reconstruction / I. Pryadko, I. Lebedev. – DOI: 10.1088/1757-899x/1079/3/032022 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079, Issue 3. – P. 032022. – EDN DLEATZ.
6. Bulbovich, R.V. The calculation of the stress-strain state of elastic orthotropic body by finite element method / R.V. Bulbovich, V.V. Pavlogradskiy, P.P. Eremenko. – DOI: 10.15593/2224-9982/2015.40.06 // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. – 2015. – 40. – 92–105. – EDN TMJGMV.

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

**Махамбетова Камажай Нурабуллаевна**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: techbeton@pguas.ru

**Гуськова Анна Геннадьевна**,  
студент  
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

**Makhambetova Kamagay Nurabullaевна**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of the  
department «Building Materials and  
Woodworking Technology»  
E-mail: techbeton@pguas.ru

**Guskova Anna Gennadyevna**,  
Student  
E-mail: techbeton@pguas.ru

## КИНЕТИКА ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОВРЕМЕННЫМИ ГИДРОФОБИЗАТОРАМИ

К.Н. Махамбетова, А.Г. Гуськова

Рассмотрена комплексная оценка влияния порошкообразных металлоорганических гидрофобизаторов на кинетику водонасыщения и морозостойкость цементных композиций. Результаты исследований показали высокую эффективность гидрофобизирующих модификаторов на основе металлоорганических соединений и позволили выявить наиболее эффективную добавку – стеарат цинка, которая снижает водопоглощение по сравнению с контрольным составом, как в ранние, так и в более поздние сроки испытания.

*Ключевые слова: цементно-песчаный раствор, гидрофобизирующие добавки, кинетика водопоглощения, показатели поровой структуры, морозостойкость*

## KINETICS OF WATER ABSORPTION AND FROST RESISTANCE OF CEMENT SYSTEMS MODIFIED WITH MODERN WATER-REPELLENTS

K.N. Makhambetova, A.G. Guskova

This article presents a comprehensive assessment of the impact of powdered organometallic water repellents on the water saturation kinetics and frost resistance of cementitious composites. The results demonstrated the high effectiveness of organometallic-based water-repellent modifiers and identified zinc stearate as the most effective additive, which reduced water absorption compared to the control composition at both early and late stages of testing.

*Keywords: cement-sand mortar, water-repellent additives, water absorption kinetics, pore structure indicators, frost resistance*

Важным параметром любого строительного материала является долговечность, то есть его способность в определенных условиях внешнего воздействия не изменять свои свойства.

Разрушение изделий определяется в основном двумя факторами – морозным воздействием и попеременным насыщением водой и высушиванием. Оно происходит под воздействием напряжений в материале при объёмных изменениях воды в порах цементного камня в процессе попеременного замораживания и оттаивания, а также напряжений, возникающих от знакопеременных деформаций усадки и набухания при попеременном воздействии воды и сухого воздуха. В связи с этим, объёмная

гидрофобизация материала позволяет существенно снизить диффузию воды в поровое пространство, обеспечивая значительное повышение показателя долговечности.

Целью настоящей работы являлась комплексная оценка влияния гидрофобных добавок на кинетику водонасыщения и морозостойкость цементных композиций. Для уменьшения водопоглощения и повышения морозостойкости цементных растворов и бетонов используются порошкообразные металлоорганические гидрофобизаторы вследствие их высокой удельной поверхности и повышенных водоотталкивающих свойств.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве вяжущего применялся Вольский цемент марки ПЦ-500Д0 с активностью 51,0 МПа и кварцевый песок Сурского месторождения с  $M_{кр}=1,54$ . Соотношение Ц:П=1:3, при В/Ц=0,54. В качестве гидрофобных добавок применены стеараты цинка  $(C_{17}H_{35}COO)_2Zn$  и кальция  $(C_{17}H_{35}COO)_2Ca$ , комплексная добавка – стеарат цинка и водорастворимый катионный флокулянт КФ-91. Дозировка гидрофобных добавок составляла 2 % от массы цемента.

Были изготовлены опытные образцы размерами 20×20×20 мм из цементно-песчаного раствора, которые твердели в нормально-влажностных условиях в течение 28 суток.

На первом этапе осуществлялось насыщение опытных образцов водой, согласно требованиям ГОСТ [1, 2]. Влияние гидрофобных добавок на кинетику водопоглощения цементных систем показано на рис. 1.

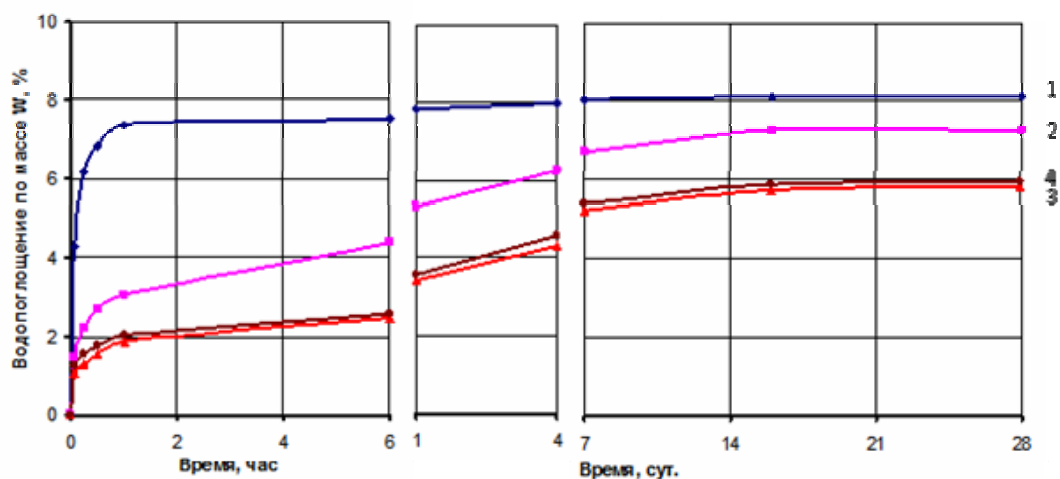


Рис. 1. Кинетика водопоглощения цементно-песчаного раствора с гидрофобизирующими добавками:

- 1 – контрольный состав без добавки; 2 – состав со стеаратом кальция 2 %;
- 3 – состав со стеаратом цинка 2 %; 4 – состав с комплексной добавкой 2 % (стеарат цинка+КФ91)

Данные на рис. 1 показывают значительное замедление кинетики водопоглощения цементно-песчаного раствора с гидрофобизирующими добавками в первые 24 часа насыщения. Минимальное водопоглощение через 28 суток (5,86 % и 5,9 %) зафиксировано для цементно-песчаного раствора, модифицированного стеаратом цинка и его комплексом с добавкой КФ-91. Практически все гидрофобизаторы снижают водопоглощение раствора в 3-5-суточном возрасте более чем на 50 % по сравнению с контрольным составом. Показатели поровой структуры приведены в табл. 1.

Несмотря на одинаковое водоцементное отношение, принятое для всех исследуемых составов, цементно-песчаный раствор с гидрофобными добавками характеризуется низкими показателями среднего размера открытых капиллярных пор в пределах 0,52-0,66. Это обусловлено не реальным уменьшением размеров пор цементно-песчаного раствора с гидрофобизирующими добавками по сравнению с контрольным составом, а изменением угла смачивания и капиллярного давления Лапласа вследствие гидрофобизации пор.

Показатели поровой структуры цементно-песчаного раствора с гидрофобизирующими добавками

№ п/п	Наименование состава	Показатели поровой структуры	
		однородность размеров открытых капиллярных пор $\alpha$	средний размер открытых капиллярных пор, равный пределу отношений ускорения процесса водопоглощения к его скорости $\lambda$
1	Контрольный состав без добавки	0,32	23,6
2	Состав со стеаратом кальция 2 %	0,40	0,66
3	Состав со стеаратом цинка 2 %	0,45	0,52
4	Состав с комплексной добавкой 2 % (стеарат цинка+КФ91)	0,40	0,66

На втором этапе определяли морозостойкость цементно-песчаного раствора по ГОСТ [3]. В исследованиях ориентировались на цементно-песчаные растворы с малыми добавками молотых пород. С целью экономии цементного вяжущего осуществляли его частичную замену (на 25 %) каменной мукой (состав 5), полученной из молотого доломитизированного известняка Воронежского месторождения.

Как известно, при отрицательных температурах вода в порах материала замерзает с увеличением объема. В процессе замораживания материала, поры которого полностью заполнены водой, могут развиваться высокие растягивающие напряжения, приводящие к разрушению. При неблагоприятной структуре пор даже очень прочные материалы неизбежно будут разрушены замерзающей водой, а величина создаваемых напряжений зависит от особенностей пористой структуры. Кроме кристаллизационного давления льда, вода вследствие термовлагопроводности мигрирует в сторону поверхности, имеющей более низкую температуру, и оказывает гидравлическое давление на стенки пор. В первую очередь вода превращается в лед в поверхностных, более увлажненных и интенсивно охлаждаемых слоях материала. По мере охлаждения образцов вначале замерзает вода в крупных порах, затем – в более мелких. С этой целью в морозостойких бетонах создаются резервные сферические поры для миграции в них вытесненной воды [4-7].

Результаты испытания цементных систем на морозостойкость приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты испытания на морозостойкость цементно-песчаного раствора с гидрофобизирующими добавками

№ п/п	Вид и дозировка добавок	Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток после насыщения образцов солевым раствором	Предел прочности при сжатии после испытаний $R_{сж}$ , МПа/число циклов в солевом растворе	Марка по морозостойкости $F$
1	Контрольный состав	23,2	22,1/13	75
2	Состав со стеаратом цинка 0,5 %	25,5	24,8/41	200
3	Состав со стеаратом цинка 1,0 %	26,2	24,9/62	300
4	Состав со стеаратом цинка 2 %	25,1	24,1/72	300
5	Состав со стеаратом цинка 2 % и каменной мукой	26,0	25,1/65	300

Характер разрушения поверхности контрольного образца от действия мороза представлен на рис. 2.



Рис. 2. Характер разрушения поверхности контрольного образца

Результаты испытания показали, что все составы из цементно-песчаного раствора, модифицированные добавкой стеарата цинка, имеют морозостойкость выше, чем у контрольного состава.

Таким образом, проведенный эксперимент показал высокую эффективность исследованных гидрофобизирующих модификаторов на основе металлоорганических соединений и позволил выявить наиболее эффективную добавку – стеарат цинка, которая снижает водопоглощение по сравнению с контрольным составом, как в ранние сроки, так и через 1-2 месяца. Исходя из более низкого водопоглощения гидрофобизированных составов, можно полагать, что гидрофобизирующие добавки будут превращать капиллярные поры в дополнительную резервную пористость, а следовательно, повышать их морозостойкость.

### Список литературы

1. ГОСТ 12730.3-78. Бетоны. Методы определения водопоглощения.
2. ГОСТ 12730.4-2020. Бетоны. Методы определения параметров пористости.
3. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.
4. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва, 1998. – 768 с.
5. Баженов, Ю.М. Технология бетона : учебник для вузов ; рек. Министерством образования РФ / Ю.М. Баженов. – 3-е изд. – Москва : Изд-во АСВ, 2002. – 499 с.
6. Батраков, В.Г. Стойкость бетонов с водорастворимыми кремнийорганическими полимерами в растворах солей высоких концентраций. Стойкость бетона и железобетонных конструкций в агрессивных средах. Науч.тр. / В.Г. Батраков, Э.И. Гусейнов // НИИЖБ; Вып.23. – Москва, 1977. – С. 12–18.
7. Москвин, В.М. Структура и морозостойкость гидротехнического бетона с добавкой ГКЖ-94 / В.М. Москвин, В.Г. Батраков, О.В. Кунцевич [и др.] // Бетон и железобетон. – 1980. – №7. – С. 20–22.

### References

1. GOST 12730.3-78. Concretes. Methods for determining water absorption.
2. GOST 12730.4-2020. Concrete. Methods for determining porosity parameters.
3. GOST 10060-2012. Concrete. Methods for determining frost resistance.
4. Batrakov, V.G. Modified Concretes. Theory and Practice / V.G. Batrakov. – 2nd ed., revised and enlarged. – Moscow, 1998. – 768 p.
5. Bazhenov, Yu.M. Concrete Technology : Textbook for Universities ; rec. by the Ministry of Education of the Russian Federation / Yu.M. Bazhenov. – 3rd ed. – Moscow : ASV Publishing House, 2002. – 499 p.

---

6. Batrakov, V.G. Durability of Concretes with Water-Soluble Organosilicon Polymers in High-Concentration Salt Solutions. Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures in Aggressive Environments. Research Papers / V.G. Batrakov, E.I. Guseinov // NIIZhB; Issue 23. – Moscow, 1977. – P. 12–18.

7. Moskvina, V.M. Structure and frost resistance of hydraulic concrete with the addition of GKZh-94 / V.M. Moskvina, V.G. Batrakov, O.V. Kuntsevich [et al.]// Concrete and reinforced concrete. – 1980. – No. 7. – P. 20–22.

*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

**Очкин Игорь Анатольевич,**  
аспирант кафедры «Физика и химия»  
E-mail: ochkin@ogroup.ru +7-903-323-01-11

**Симонов Тимофей Денисович,**  
студент 1-го курса  
E-mail: simonovtimoha942@gmail.com

**Грейсух Григорий Исаевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Физика и химия»  
E-mail: grey@pguas.ru

**Захаров Олег Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Физика и химия»  
E-mail: zoa\_pnz@mail.ru

**Очкина Наталья Александровна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Физика и химия»  
E-mail: ochkina.natalya@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

**Ochkin Igor Anatolyevich,**  
Postgraduate student  
E-mail: ochkin@ogroup.ru

**Simonov Timofey Denisovich,**  
First-year student  
E-mail: simonovtimoha942@gmail.com

**Greisukh Grigory Isaevich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the Department  
«Physics and Chemistry»  
E-mail: grey@pguas.ru

**Zakharov Oleg Aleksandrovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department «Physics and Chemistry»  
E-mail: zoa\_pnz@mail.ru

**Ochkina Natalia Aleksandrovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department «Physics and Chemistry»  
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

## ПРОЧНОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ ТЯЖЕЛЫХ И ОСОБО ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ: ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ

И.А. Очкин, Т.Д. Симонов, Г.И. Грейсух, О.А. Захаров, Н.А. Очкина

Приведен теоретический анализ современных научно-технических публикаций и нормативной документации, посвященных вопросам прочности на растяжение при изгибе тяжелых и особо тяжелых бетонов. Рассмотрены основные факторы влияния: структурные особенности заполнителей (плотных и специальных), виды дисперсного армирования и технологические приемы. Систематизированы методы повышения прочности на изгиб, включающие оптимизацию зернового состава, применение суперпластификаторов и введение фиброволокон (стальных, базальтовых и др.). Выявлено, что на особо тяжелые бетоны (радиационно-стойкие) критическое влияние оказывают качество и тип заполнителя. В результате обзора обоснованы наиболее эффективные технологические приемы, позволяющие повысить предел прочности на изгиб, что особенно актуально для радиационно-защитных и специальных конструкций.

*Ключевые слова: прочность при изгибе, тяжелый и особо тяжелый бетон, тип заполнителя, дисперсное армирование, виброцентрифугирование*

## FLEXURAL STRENGTH OF HEAVY AND EXTRA HEAVY CONCRETE: INFLUENCING FACTORS AND METHODS OF IMPROVEMENT

I.A. Ochkin, T.D. Simonov, G.I. Greisukh, O.A. Zakharov, N.A. Ochkina

This paper presents a theoretical analysis of modern scientific and technical publications and regulatory documentation on the flexural tensile strength of heavy and extra-heavy concrete. Key

influencing factors are considered, including the structural properties of aggregates (dense and special), types of dispersed reinforcement, and technological methods. Methods for increasing flexural strength are systematized, including optimizing the grain size distribution, using superplasticizers, and introducing fiber reinforcement (steel, basalt, etc.). It is found that for extra-heavy (radiation-resistant) concrete, the quality and type of aggregate have a critical impact. The review substantiates the most effective technological methods for increasing flexural strength, which is particularly relevant for radiation-protective and special structures.

*Keywords: flexural strength, heavy and extra heavy concrete, filler type, dispersed reinforcement, vibrocentrifugation*

В современном строительстве железобетонные конструкции работают не только на сжатие, но и на изгиб: плиты перекрытий, балки, дорожные плиты, шпалы, фундаменты под динамическое оборудование.

Прочность бетона при изгибе является важнейшей характеристикой для тяжелых и особо тяжелых бетонов, применяемых в специальных сооружениях (защитных оболочках атомных электростанций (АЭС), хранилищах радиоактивных отходов, исследовательских лабораториях и других объектах атомной энергетики).

Тяжелые бетоны имеют плотность более 2500 кг/м<sup>3</sup> (в зависимости от типа заполнителя и водоцементного отношения (В /Ц)) и способны обеспечивать прочность на сжатие, сопоставимую с высокопрочными бетонами (классы В30-В60 и выше) (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Характеристики бетонов на тяжелых заполнителях [1-4]

Тип бетона/ заполнителя	Класс бетона	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на сжатие, МПа
Обычный тяжелый бетон:			
на гранитном щебне	В30-В60+	2350-2450	39,3-78+
на гравийном щебне	В15-В30	2300-2400	19,6-39,3
Магнетитовый	В40-В80	3900-4500	52-100+
Хромитовый	В40-В60	3500-4000	52-78
Гематитовый	В40-В70	3200-3600	52-90+
Баритовый	В20-В40	2700-3800	26-40 (до 47 в составе с гематитом)
Серпентинитовый	В25-В45	2600-2900	32-48
Лимонитовый	В20-В35	2300-2600	26-45

Предел прочности тяжёлого бетона при изгибе не является прямым следствием его плотности или класса на сжатие, а определяется комплексом факторов, включая адгезию, шероховатость заполнителя (эти факторы определяют качество контактной зоны между цементным камнем и заполнителем) и другие характеристики состава и условий приготовления бетона (табл. 2). Это связано с особенностями взаимодействия компонентов бетонной смеси и их влиянием на механические свойства материала.

Т а б л и ц а 2

Характеристики прочности бетона при изгибе (28 суток)

Тип бетона/ заполнителя	Модуль упругости, ГПа (для В25-В40)	Прочность при изгибе, МПа (класс бетона В30)	Зона контакта заполнителя с цементным камнем
Гранитный щебень	28-36	4,8-5,6	Хорошая
Гравийный щебень	24-32	4-4,7	Низкая/средняя
Магнетитовый	35-45+	4,2-5,0	Средняя
Гематитовый	32-42	3,8-5,6	Слабая
Хромитовый	35-40+	4,4-5,9	Высокая
Баритовый	35-45	3,0-5,1	Средняя/высокая
Серпентинитовый	24-35	3,5-5,0	Высокая (за счет структуры)
Лимонитовый	20-30	2,2-3,4	Средняя/высокая

Хорошее сцепление позволяет включить жёсткие и прочные заполнители в работу до исчерпания их прочностных возможностей, что способствует упрочнению бетона за счёт разгрузки матрицы. При низком сцеплении разрушение может происходить при малой нагрузке, и прочность бетона окажется ниже прочности матрицы. Экспериментальные данные показывают, что увеличение шероховатости зёрен заполнителя сдерживает процесс образования и развития трещин в зоне контакта между заполнителем и цементным камнем при действии нагрузки, что способствует улучшению прочностных и деформативных свойств бетона. Например, уменьшение поверхностной шероховатости стеклянных шариков и цилиндров кварцита с 4-5 до 0 мкм снижает прочность бетона на 8,4-11,9 %. Шероховатость поверхности повышает характеристику сцепления на отрыв и сдвиг в 1,5-2 раза [5]. Форма зёрен также играет роль. Шероховатая и угловатая поверхность крупного заполнителя (например, гранитного щебня) улучшает адгезию с цементным камнем, что повышает прочность бетона по сравнению с использованием гравия. На прочность бетона при изгибе могут влиять: соотношение между крупным и мелким заполнителем в составе бетона; активность (марка) цемента; содержание лещадных частиц; дисперсное армирование (например, полипропиленовая фибра может повысить прочность при изгибе на 40 %); количество вовлечённого в бетонную смесь воздуха (хотя это чаще влияет на прочность при сжатии); водоцементное отношение (снижение В/Ц с 0,8 до 0,4 может увеличить прочность при изгибе в 2-2,5 раза) [6].

Для тяжёлых бетонов класса В30 гранит обеспечивает стабильный предел прочности при изгибе 4,8-5,6 МПа. Он остается оптимальным выбором для обычных изгибаемых конструкций (плиты перекрытий, балки, дорожные плиты) благодаря сбалансированным свойствам: высокой адгезии, отсутствию побочных эффектов (магнетизм, хрупкость зёрен), технологичности и умеренной стоимости.

Снижение на 12-18 % прочности на изгиб у бетона на гравийном заполнителе, по сравнению с гранитным, объясняется гладкой окатанной поверхностью и меньшей собственной прочностью гравия. Такой бетон допустим лишь для конструкций с невысокими требованиями по трещиностойкости и при отсутствии гранитного щебня. Для ответственных пролетных строений гравий не рекомендуется.

Увеличение плотности бетона до 3500-5000 кг/м<sup>3</sup> (для защиты от радиации) автоматически не повышает прочность на изгиб, а часто снижает её из-за хрупкости минералов, анизотропии кристаллов и ослабленной зоны контакта. Хромитовый бетон признан лучшим среди особо тяжёлых. Он достигает уровня гранита (98-105 %) благодаря высокой шероховатости дробленого хромита, высокому модулю упругости и химической инертности по отношению к цементу. Рекомендуется для изгибаемых элементов защитных сооружений (балки, перекрытия АЭС).

Прочностные свойства на изгиб у магнетитового бетона чуть ниже, по сравнению с гранитным, за счёт слоистости кристаллов. При высоких классах (В40+) он догоняет гранит за счёт собственной прочности зёрен, однако требует повышенного расхода цемента и добавок. Магнитные свойства магнетита усложняют армирование бетона.

Гематит хрупкий, на поверхности зёрен часто есть окислы, снижающие адгезию. При изгибе микротрещины в нем зарождаются раньше, чем в магнетите. Его применение в изгибаемых элементах допустимо только с модификаторами (микрокремнезем, грунтовка зёрен) или при абсолютном приоритете радиационной защиты над прочностью.

Барит химически относительно инертен к продуктам гидратации цемента. В отличие от кварцевого песка или некоторых других заполнителей, он не вступает в активные химические реакции, способствующие сильной адгезии. Основным механизмом сцепления барита с цементным камнем является физическая адгезия (за счёт сил молекулярного взаимодействия) и механическое сцепление за счёт шероховатости поверхности частиц. Использование тонкомолотого барита увеличивает удельную поверхность, обеспечивая лучший контакт с цементом. Прочность баритового бетона при изгибе (3,0-4,6 МПа) может повышаться при введении стальной фибры в количестве 0,5-1,0 % от массы бетона [7]. Добавление нанокремнезема (нано-SiO<sub>2</sub>)

также может увеличивать прочность на изгиб баритового бетона. При добавлении 2 % нано-SiO<sub>2</sub> прочность возрастает на 25 % [8].

Для повышения прочности особо тяжёлого бетона на изгиб применяются различные методы, которые включают дисперсное армирование, использование химических добавок, оптимизацию состава смеси и некоторые технологические приёмы. Дисперсное армирование предполагает равномерное распределение микроарматуры (фибры) по объёму бетонной матрицы. Это позволяет улучшить прочность на изгиб, трещиностойкость, ударо- и износостойкость. Волокна для армирования могут быть стальные, стеклянные, базальтовые, полипропиленовые, углеродные, нейлоновые, акриловые, полиэфирные, хлопковые и др. В России широко применяется базальтовое волокно. Положительное влияние армирования начинает сказываться после достижения объёмной концентрации фибры, обеспечивающей начальную объёмно-пространственную связность фиброструктуры. Максимальная прочность достигается при оптимальной объёмной дозировке волокон (например, для базальтовой фибры – около 5 %).

Использование металлической или базальтовой фибры с длиной, превышающей максимальную крупность заполнителя, при дозировке по объёму от 3 до 5 % и содержании цемента более 400 кг/м<sup>3</sup> позволяет получить прочность на растяжение при изгибе до 19,5 МПа, что в 3 раза больше по сравнению с бетоном без микроарматуры [9].

К наиболее эффективным химическим добавкам, способным направленно воздействовать на структуру бетона и повышать его прочность на изгиб относятся: пластификаторы и суперпластификаторы (они снижают пористость готового изделия, повышают механическую прочность, влагостойкость и коррозионную стойкость); микрокремнезем (уплотняет структуру бетона, способствует образованию низкоосновных гидросиликатов кальция, что позволяет получить бетоны высокой прочности); комплексные добавки (включают несколько составляющих различного назначения, могут увеличивать прочность на сжатие и изгиб, а также повышать влагостойкость, морозостойкость и износостойкость); наномодификаторы на основе кремнийорганических полимеров (могут использоваться для повышения долговечности бетона, в том числе за счёт структурирования замкнутой капиллярной пористости) [10]. При этом важно точно соблюдать рекомендуемые дозировки добавок и учитывать их совместимость с другими компонентами бетона (цемент, заполнители, арматура).

Оптимизация состава смеси для повышения прочности при изгибе может быть достигнута путем подбора компонентов, то есть рационального выбора вяжущих веществ, заполнителей и их соотношения; снижения (В/Ц) для уменьшения пористости и повышения прочности цементного камня; применения тонкодисперсных наполнителей. Например, введение микрокварца (молотого песка) и микрокремнезёма может увеличить прочность при изгибе.

В качестве дополнительных методов предлагаются применение напрягающего цемента и преднапряжённой арматуры. Натяжение арматуры с закреплением концов механическим или электротермическим методом позволяет перевести бетон в сжатое состояние, которое воспринимает более высокие изгибающие и растягивающие нагрузки [11-12].

Технологические приемы для повышения прочности тяжелых бетонов при изгибе включают контроль качества бетонной смеси и виброцентрифугирование. Результаты исследований показали, что сочетание виброцентрифугирования и стальной фибры оказывает существенное положительное влияние на прочность при растяжении. Например, по данным одного из экспериментов, для бетонов класса В60 было установлено, что такое сочетание технологий даёт прирост прочности при изгибе на 16 %, по сравнению с контрольным составом виброцентрифугированного бетона и на 26 %, по сравнению с контрольным составом центрифугированного бетона [13].

При выборе метода или их комбинации необходимо учитывать конкретные условия применения, требования к конструкции, качество исходных материалов и другие факторы. Эффективность методов часто требует экспериментальной проверки и технико-экономического обоснования.

## Список литературы

1. Калашников, В.И. Оптимизация состава особо тяжелого высокопрочного бетона для защиты от радиации / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, Д.В. Калашников, К.Н. Махамбетова // *Строительные материалы*. – 2011. – №8. – С. 25–28.
2. Прошин, А.П. Строительные растворы и бетоны для защиты от радиации / А.П. Прошин, Е.В. Королёв, В.С. Демьянова, П.Г. Комохов. – Пенза : ПГУСА, 2005.
3. Былкин, Б.К. Выбор бетонов радиационной защиты для АЭС нового поколения / Б.К. Былкин, И.А. Енговатов, А.Н. Кожевников // *Атомная энергия*. – 2015. – Т. 118, вып. 6.
4. Сопин, Д.М. Разработка составов радиационно-защитного бетона / Д.М. Сопин, С.В. Ключев, М.С. Агеева, Р.В. Лесовик, Г.Г. Богусевич // *Строительные материалы и изделия*. – 2020. – Т. 3, № 5. – С. 24 – 33.
5. Каримов, И.Ш. Прочность сцепления цементного камня с заполнителями в бетоне и факторы, влияющие на нее / И.Ш. Каримов // *Технологии бетонов. Сухие строительные смеси*. – 2013. – №4. – С. 28–31.
6. Захаров, Д.С. Анализ факторов, влияющих на прочность при изгибе бетонов транспортного назначения / Д.С. Захаров // *Вестник ХНАДУ*. – 2017. – Вып. 7. – С. 151–157.
7. Новиков, Н.В. Баритсодержащие радиационно-защитные строительные материалы / Н.В. Новиков, С.В. Самченко, Г.Э. Окольников // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. – 2020. – Т. 21, № 1. – С. 94–98.
8. Rong, Z. Effects of nano-SiO<sub>2</sub> particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites / Z. Rong, W. Sun, H. Xiao, G. Jiang // *Cement and Concrete Comp.* – 2015. – Vol. 56. – P. 25–31.
9. Московский, С.В. Влияние дисперсного армирования на деформационно-прочностные свойства бетона / С.В. Московский, А.С. Носков, В.С. Руднов, В.Н. Алехин // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. – 2016. – № 3. – С. 67–71.
10. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов : монография / О.В. Артамонова; Воронежский ГАСУ. – Воронеж, 2016. – 100 с.
11. Кауров, А.И. Влияние предварительного напряжения высокопрочной арматурной стали класса Ат1200 (Ат-УП) на напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов : дис. ... канд. наук: 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / А.И. Кауров ; ФГБОУ ВО Восточно-Сибирский государственный университет технологий управления. – 2017. – 324 с.
12. Кудяков, К.Л. Влияние параметров предварительного напряжения арматуры композитной полимерной на жесткость и трещиностойкость изгибаемых бетонных элементов. Подготовка и проведение экспериментальных исследований / К.Л. Кудяков, А.В. Бучкин, Е.Ю. Юрин, С.К. Хлебников, В.А. Пентюхова // *Вестник НИЦ «Строительство»*. – 2023. – №39(4) – С. 68–81.
13. Стельмах, С.А. Исследование изменения прочности дисперсно-армированных высокопрочных центрифугированного и виброцентрифугированного бетонов на растяжение при изгибе в зависимости от типа применяемого фибрового волокна / С.А. Стельмах, Е.М. Щербань, А.А. Чернильник, С.А. Антоненко, П.С. Гребенюк // *Вестник Евразийской науки*. – 2019. – № 5, т. 11. – С. 1–10.

## References

1. Kalashnikov, V.I. Optimization of the composition of especially heavy high-strength concrete for radiation protection / V.I. Kalashnikov, V.S. Demyanova, D.V. Kalashnikov, K.N. Makhambetova // *Construction materials*. – 2011. – No. 8. – P. 25–28.
2. Proshin, A.P. Construction solutions and concrete for radiation protection / A.P. Proshin, E.V. Korolev, V.S. Demyanova, P.G. Komokhov. – Penza : PSUSA, 2005.

- 
3. Bylkin, B.K. Selection of radiation protection concretes for new generation nuclear power plants / B.K. Bylkin, I.A. Engovatov, A.N. Kozhevnikov // *Atomic Energy*. – 2015. – Vol. 118, Issue 6.
  4. Sopin, D.M. Development of radiation-protective concrete compositions / D.M. Sopin, S.V. Klyuev, M.S. Ageeva, R.V. Lesovik, G.G. Bogusevich // *Construction materials and products*. – 2020. – Vol. 3, No. 5. – P. 24–33.
  5. Karimov, I.Sh. Strength of adhesion of cement stone to aggregates in concrete and factors influencing it / I.Sh. Karimov // *Concrete technologies. Dry building mixes*. – 2013. – No. 4. – P. 28–31.
  6. Zakharov, D.S. Analysis of factors influencing the flexural strength of concrete for transport purposes / D.S. Zakharov // *Bulletin of KhNADU*. – 2017. – Issue 79. – P. 151–157.
  7. Novikov, N.V. Barite-containing radiation-protective building materials / N.V. Novikov, S.V. Samchenko, G.E. Okolnikova // *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. – 2020. – Vol. 21, No. 1. – P. 94–98.
  8. Rong, Z. Effects of nano-SiO<sub>2</sub> particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites / Z. Rong, W. Sun, H. Xiao, G. Jiang // *Cement and Concrete Comp.* – 2015. – Vol. 56. – P. 25–31.
  9. Moskovsky, S.V. Effect of dispersed reinforcement on the deformation-strength properties of concrete / S.V. Moskovsky, A.S. Noskov, V.S. Rudnov, V.N. Alekhine // *Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN*. – 2016. – No. 3. – P. 67–71.
  10. Synthesis of nanomodifying additives for the technology of building composites: monograph / O.V. Artamonova; Voronezh GASU. – Voronezh, 2016. – 100 p.
  11. Kaurov, A.I. Effect of prestressing high-strength reinforcing steel class At1200 (At-YII) on the stress-strain state of bending reinforced concrete elements : dis. ... Cand. of Sciences: 05.23.01 «Building structures, buildings and structures» / A.I. Kaurov ; FSBEI HE East Siberian State University of Management Technologies. – 2017. – 324 p.
  12. Kudyakov, K.L. Influence of prestressing parameters of composite polymer reinforcement on the stiffness and crack resistance of bending concrete elements. Preparation and conduct of experimental studies / K.L. Kudyakov, A.V. Buchkin, E.Yu. Yurin, S.K. Khlebnikov, V.A. Pentyukhova // *Bulletin of the Scientific Research Center «Construction»*. – 2023. – No. 39(4). – P. 68–81.
  13. Stelmakh, S.A. Study of changes in the tensile strength of dispersion-reinforced high-strength centrifuged and vibrocentrifuged concrete under bending depending on the type of fiber used / S.A. Stelmakh, E.M. Shcherban, A.A. Chernilnik, S.A. Antonenko, P.S. Grebenyuk // *Bulletin of Eurasian Science*. – 2019. – No. 5, Vol. 11. – P. 1–10.