

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

Редакторы: М.А. Сухова,
Н.Ю. Шалимова

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 2(19)/2024 Содержание

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА..... 3

Береговой В.А., Теплова В.Р.
ПИКСЕЛЬНАЯ МОЗАИКА ИЗ ПОРОШКОВОГО
АРХИТЕКТУРНОГО БЕТОНА ДЛЯ ФАСАДОВ
И ИНТЕРЬЕРОВ ЗДАНИЙ..... 3

Береговой А.М., Присевка А.С.
ВОЗДУХООБМЕН ПОМЕЩЕНИЙ
МНОГОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ..... 9

Грачева Ю.В., Сафин Р.Б.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ
ПРИ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ..... 14

**Ерошкина Н.А., Коровкин М.О.,
Харнаев А.В., Шульте И.С.**
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ
ПЕРЕРАБОТКИ БЕТОННОГО ЛОМА
В ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОПОЛИМЕРНОГО
БЕТОНА..... 18

Лавров И.Ю.
РАЗРАБОТКА СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО
БЕТОНА С ЗАДАНЫМИ УСАДОЧНЫМИ
И ДИНАМИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ..... 25

**Мартышкин Д.О., Арискин М.В.,
Залилов И.В.**
СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ БОЛТЫ
СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ..... 31

**Махамбетова К.Н., Лавров И.Ю.,
Сидорин С.П.**
ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ DIS И CV
В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ.. 37

**Мирсаяпов И.Т., Селиванов А.В.,
Регер Ф.Ф., Вансович К.А.**
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ
ПЛИТЫ-ОБОЛОЧКИ ПЕРЕКРЫТИЯ..... 44

Петров А.А., Самошин А.П.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕСТНИЦЫ
ДЛЯ МАЛОЭТАЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА
В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ 56

Шурыгин И.С., Береговой В.А. СПОСОБЫ ДЕЛИГНИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ДРЕВЕСНО-СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКОВ.....	62	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ	73
СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.....	69	Лысый С.П., Толушов С.А., Абдуллаев Д.А. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ В AUTOCAD: ОТ ИДЕИ ДО РЕАЛИЗАЦИИ.....	73
Крамор Д.Д., Максимова И.Н. СТАТИСТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММЫ ПАРЕТО НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЖАРОЧНОГО ШКАФА.....	69		

Contents

CONSTRUCTION. ARCHITECTURE ...3	Mirsayapov I.T., Selivanov A.V., Reger F.F., Vansovich K.A. COMPUTER SIMULATION OF STRESS- STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE PLATE-SHELL OF FLOOR.....	45	
Beregovoy V.A., Teplova V.R. PIXEL MOSAIC MADE OF POWDERED ARCHITECTURAL CONCRETE FOR FACADES AND INTERIORS OF BUILDINGS.....	3	Petrov A.A., Samoshin A.P. DESIGNING A STAIRWAY FOR LOW-RISE CONSTRUCTION IN LIMITED SPACE	56
Beregovoy A.M., Prisevka A.S. AIR EXCHANGE OF ROOMS IN MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING	9	Shurygin I.S., Beregovoy V.A. METHODS OF BLEACHING HARDWOOD TO PRODUCE TRANSPARENT WOOD- LAMINATED PLASTICS	62
Gracheva Yu.V., Safin R.B. DETERMINATION OF THE LATERAL PRESSURE COEFFICIENT IN TRIAXIAL TESTS.....	14	STANDARDIZATION AND QUALITY MANAGEMENT	69
Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Kharnaev A.V., Schulte I.S. THE USE OF SCRAP CONCRETE PROCESSING PRODUCTS IN THE PRODUCTION OF GEOPOLYMER CONCRETE	18	Kramor D.D., Maksimova I.N. STATISTICAL REGULATION USING THE PARETO DIAGRAM ON THE EXAMPLE OF PRODUCTION ELECTRIC FRYING PAN	69
Lavrov I.Yu. DEVELOPMENT OF A FINE-GRAINED CONCRETE COMPOSITION WITH SPECIFIED SHRINKAGE AND DYNAMIC CHARACTERISTICS	25	MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND SOFTWARE PACKAGES.....	73
Martyshkin D.O., Ariskin M.V., Zalilov I.V. FIBERGLASS BOLTS FOR JOINTS OF WOODEN STRUCTURES	31	Lysy S.P., Tolushov S.A., Abdullaev D.A. 3D MODELING IN AUTOCAD: FROM IDEA TO IMPLEMENTATION	73
Makhambetova K.N., Lavrov I.Yu., Sidorin S.P. TECHNICAL ASPECTS OF APPLICATION OF TECHNOLOGIES DIC AND CV IN CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE.....	37		

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

УДК 691.327-431

*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»

Теплова Виктория Романовна,
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

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

Teplova Viktoriya Romanovna,
Student
E-mail: techbeton@pguas.ru

ПИКСЕЛЬНАЯ МОЗАИКА ИЗ ПОРОШКОВОГО АРХИТЕКТУРНОГО БЕТОНА ДЛЯ ФАСАДОВ И ИНТЕРЬЕРОВ ЗДАНИЙ

В.А. Береговой, В.Р. Теплова

Предложен подход к решению задачи оформления фасадов зданий защитно-декоративными покрытиями на основе малоразмерных элементов из порошкового архитектурного бетона. Выполнен анализ компонентного состава сырьевых масс для изготовления бетонных элементов мозаики по показателю колориметрии. На основе эксперимента показана возможность практической реализации технологии пиксельной мозаики путем сборки заданного изображения из отдельных карт в диапазоне цветов, характерных для естественной окраски цементных композиций.

Ключевые слова: пиксельная мозаика, технология, порошковый бетон, колориметрия

PIXEL MOSAIC MADE OF POWDERED ARCHITECTURAL CONCRETE FOR FACADES AND INTERIORS OF BUILDINGS

V.A. Beregovoy, V.R. Teplova

An approach to solving the problems of decorating building facades with protective and decorative coatings based on small-sized elements made of powdered architectural concrete is proposed. The analysis of the component composition of raw materials for the manufacture of concrete mosaic elements in terms of colorimetry was performed. Based on the experiment, the possibility of practical implementation of pixel mosaic technology by assembling a given image from individual maps in a range of colors characteristic of the natural coloring of cement compositions is shown.

Keywords: pixel mosaic, technology, powder concrete, colorimetry

Современное строительство нуждается в производстве недорогих и технологичных отделочных материалов для создания архитектурно-выразительных защитных покрытий. В этом аспекте потенциалом обладают цементные композиты, вырабатываемые на основе современных рецептур, обеспечивающих достижение физико-механических показателей, сравнимых с показателями стекла и керамики, традиционно применяемых в мозаичных панно. Себестоимость бетонной мозаики является не единственным ее преимуществом. В этом ряду можно отметить отсутствие высокотемпературных технологических процессов, легкость формования и изменения формфактора элементов. Однако остаются не до конца решенными вопросы, связанные с качеством окрашивания цементных материалов и сохранением насыщенности цветов в процессе долговременной эксплуатации.

Порошковые бетоны содержат природный кварцевый песок в качестве инертного заполнителя, а вяжущее состоит из цемента, тонкомолотых каменных материалов, мелкого песка и микрокремнезема. Обязательным компонентом сырьевой смеси является гиперпластификатор последнего поколения на основе карбоксилатов. Небольшие размеры пазлов позволяют исключить один из главных недостатков всех мелкозернистых бетонов – значительные собственные деформации изделий из-за отсутствия в объеме твердеющего материала каркаса из зерен крупного заполнителя.

Учитывая региональную специфику, важно отметить преобладание в Пензенской области месторождений мелких и очень мелких кварцевых песков. Практика проведенных экспертных работ показывает, что по показателю гранулометрии наиболее многочисленные фракции местных песков ограничены пределом 0,63 мм (фото 1). По величине модуля крупности такие пески относят к мелкой разновидности ($M_k=1,5...2,0$), однако с учетом фактической величины полного остатка на сите № 063 (менее 10 %) – это очень мелкие пески (табл. 1).



Фото 1. Внешний вид пробы и результат отсева песка на фракции

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний песка (адрес отбора проб: Пензенский район, Пензенская обл.)

Наименование показателей	Значение	
Насыпная плотность, кг/м ³	1386	
Истинная плотность, кг/м ³	2615	
Гранулометрический состав: остаток на сите, мм	наименование остатка (%)	
	частный	полный
10,0	0	0
5,0	0	0
2,5	7	0,35
1,25	11	0,9
0,63	47	3,27
0,315	1387	73
0,16	497	97,99
менее 0,16	40	100
Модуль крупности M_k	1,76	

В перспективе пензенские карьеры целесообразно оснастить мощностями по обогащению песка, когда мелкие фракции отделяются с переводом оставшегося материала в разряд высококачественного заполнителя для строительных работ. При этом мелкие фракции можно утилизировать в технологии порошковых мозаичных бетонов.

Специфика материала обеспечивает возможность выбора наиболее подходящего для конкретной задачи способа монтажа (отдельными блоками, инкрустацией, интарсией или паркетри). По первому методу композиция собирается из отдельных фрагментов, предварительно набранных на сетчатой основе. Для паркетри выбираются элементы правильной геометрической формы. Перед укладкой по этому методу изображение с помощью графических компьютерных программ разбивается на отдельные прямоугольники, треугольники, трапеции. Инкрустация предусматривает укладку пазлов в углубления на рабочей поверхности. При интарсии для создания рисунка используют элементы различной толщины, в результате получается рельефная плоскость [1]. За счет изменения материала подложки, на которой формируется бетонная смесь, можно легко регулировать не только текстуру, но и степень блеска лицевой поверхности от матового до глянца.

Исходя из сложности цветного окрашивания бетонных пазлов, на первом этапе исследований предусматривают изготовление мозаичных покрытий в скандинавском стиле, т.е. с применением элементов в палитре от белого до темно-серого цветов. Белый цвет создается за счет применения в составе белого портландцемента с добавлением при необходимости пигментов в виде оксида титана или микрометрического CaCO_3 (мел, мрамор и др.). Оттенки серого – за счет смешивания в различном соотношении белого и серого цемента, а черный достигается введением щелочестойкого черного красителя.

Выбор черного пигмента производили из группы искусственных материалов. Данные вещества получают путем переработки одного или нескольких сырьевых компонентов с изменением структуры и состава конечного продукта. Наиболее распространенными из них являются сажа и металлические соединения в виде оксидов железа (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Искусственные черные пигменты для мозаичного бетона

Название	Химический состав	Содержание: оксиды железа/углерод, %	Дозировка, % от цемента
Ferren (Чехия): BP-510	$\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MnO}$	10,0/0	2...5
BP-600	$\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MnO}$	48,0/0	2...5
BP-630	$\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$	97,0/0	2...5
TongChem778 (Китай)	$\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{C}_{(\text{сажа})}$	92/8	2...4
Технический углерод П-324	$\text{C}_{(\text{сажа})}$	0/100	1...3

Общим недостатком железосодержащих пигментов является недостаточная интенсивность черного цвета. Для ее повышения используют смесевые составы с сажей (например TongChem 778). Наряду с повышением декоративных свойств, такое решение часто сопровождается дефектом окрашенной поверхности в виде ее меления за счет постепенного вымывания частиц углерода. Для лучшей фиксации гидрофобной сажи используют два технических приема в зависимости от желаемого эффекта: при объемном окрашивании бетона состав пигмента усложняют добавками ПАВ; при поверхностном – производят пропитку изделий кремнийорганическими растворами.

Важно отметить, что использование черного пигмента на основе технического углерода сильно влияет на диэлектрическую проницаемость бетона. Потенциально это расширяет использование черного бетона за счет нетрадиционных областей, таких, как абсорберы солнечного тепла, электрические нагреватели для таяния снега, системы заземления и катодной защиты и т.д. Согласно опубликованным данным, введение 3...5 % углерода снижает удельное электрическое сопротивление бетона в 2,9...3,6 раза

(до 4900...3900 Ом·с) [2]. Вместе с тем отмечается некоторое падение прочности черного бетона на растяжение при изгибе.

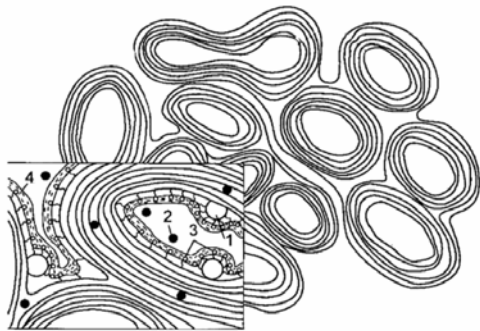


Рис. 1. Схема глобулярного строения шунгита [3]:

1 – фуллерены; 2 – органо-металлические соединения, 3-4 – поверхностно-активные центры

Одно из возможных решений задачи повышения качества объемного окрашивания цементных бетонов в черный цвет заключается в использовании пигментов природного происхождения, таких, как тонкомолотый шунгит или обсидан. Это повысит термостойкость придаваемого цвета до 800 °С и надежную фиксацию частиц пигмента в цементной матрице. Благодаря своему генезису шунгитовый пигмент содержит твёрдый углерод и значительное количество SiO₂. Оба компонента представлены химически активными формами с высокой удельной площадью поверхности. Согласно существующим представлениям, шунгитовая глобула представляет собой сферическое многослойное углеродное образование размером около 10 нм (рис. 1), а

минеральная часть породы – это аморфизированный диоксид кремния, сформированный в результате выбросов вулканического пепла.

Обсидан характеризуется высоким содержанием кремнекислоты ($65\% \leq \text{SiO}_2 \leq 75\%$), находящейся в смеси с глинозёмом ($10\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 18\%$). Таким образом, неуглеродная часть шунгита, как и основная часть обсидана, относятся к природным пуццоланам, которые активно взаимодействуют с известью, выделяемой на ранней стадии гидратации портландцемента с эффектом упрочнения цементного камня.

Анализ нормативной литературы и опубликованных ранее данных [4] позволил сформулировать требования к основным показателям свойств для элементов пиксельной мозаики: прочность при сжатии – не менее 120 МПа; на растяжение – не менее 10 МПа; статический модуль упругости – 42 ГПа; средняя плотность – 2200...2300 кг/м³; теплоемкость – 1,2 кДж/(кг·°С); теплопроводность – 3,0 Вт/(м·°С); термическое расширение – $(9...11) \cdot 10^{-6}$ [°С⁻¹]; Мрз – не менее 200.

На сегодняшний день изготовлены пробные партии мозаичных чипов из порошкового бетона в палитре от темно-серого до белого цвета. Формовку чипов производили способом свободной заливки самоуплотняющейся смеси порошкового бетона в многоразовые силиконовые формы. Механические испытания подтвердили высокий коэффициент конструкционного качества мозаичного бетона (ККК ≥ 35).



Рис. 2. Внешний вид бетонных пазлов: экспериментальные образцы 4-х оттенков (слева); поверхность белого образца (белый глянец), процесс сборки панно из отдельных блоков (карт)

Отличительной особенностью разработанных рецептов является применение отечественных компонентов и литьевой технологии заливки бетонной мозаики. Это обеспечивает легкость варьирования формфактора элементов, что важно в рамках реализации индивидуальных дизайнерских проектов способом интарсии.

Значительные временные затраты на ручную сборку художественных панно, отсутствие узкопрофильных специалистов снижают привлекательность такого вида отделки при проектировании. Развитие цифровых технологий и робототехники дают инструментарий для преодоления данного ограничения. В настоящее время разработаны роботизированные станки, выполняющие технологические операции по автоматизированной выкладке мозаик из цветных стеклянных элементов (фото 2). Процесс сборки включает следующие основные этапы [5]:

- цифровую обработку изображения с целью корректировки цвета и замены цветовой палитры с учетом имеющегося набора цветов;
- построение схемы выкладки чипов мозаики;
- роботизированную выкладку чипов мозаики;
- нумерацию сборочных листов для монтажа мозаичного панно.

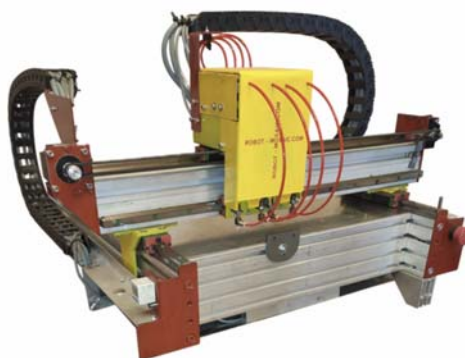


Фото. 2. Роботизированный станок для автоматизированной выкладки мозаики

Согласно данным производителя, средняя скорость сборки 1 м² мозаики составляет 2,5...3,0 часа при максимальном количестве цветов палитры, равном 32.

Выводы

Анализ результатов проведенных экспериментов свидетельствует о целесообразности применения порошкового архитектурного бетона в качестве материала мозаики. Бетонные панно обеспечивают технологичность работ по оформлению фасадов и интерьеров зданий, придавая им архитектурную выразительность и индивидуальность. Порошковый архитектурный бетон предоставляет свободу выбора наиболее выразительного способа укладки (их сочетания) для реализации самых оригинальных проектов дизайна.

Относительная легкость регулировки формфактора бетонных элементов обуславливает актуальность применения цифровых технологий с целью автоматизации процесса проектирования панно методом пиксельной генерации изображения. Дальнейшее развитие лежит на пути разработки и применения роботизированных станков для сборки пиксельного изображения из бетонных элементов, а также придания бетонным панно новых качеств (флюоресценция, самоочищение, теплоаккумуляция, электропроводность).

Список литературы

1. Логанина, В.И. Архитектурно-дизайнерское материаловедение / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына. – М.: Изд-во Юрайт, 2024. – 183 с.
2. Яковлев, Г.И. Свойства цементных матриц с повышенной электропроводностью / Г.И. Яковлев, В. Черни, И.А. Пудов, И.С. Полянских [и др.] // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2 (799). – С. 11–20.

-
3. Ковалевский, В.В. Структура шунгитового углерода / В.В. Ковалевский // Журнал неорганической химии. – 1994. – №. 39. – С. 28–32.
 4. Береговой, В.А. Высокофункциональные бетоны в станкостроении: технологические аспекты применения / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4. – С. 18–26.
 5. Интернет-ресурс <https://robot-mosaic.com/product.html> /дата обращения 19.09.2024/

References

1. Loganina, V.I. Architectural and design materials science / V.I. Loganina, S.N. Kis-litsyna. – М.: Yurait Publishing House, 2024. – 183 p.
2. Yakovlev, G.I. Properties of cement matrices with increased electrical conductivity / G.I. Yakovlev, V. Cherni, I.A. Pudov, I.S. Polyanskikh [etc.] // Building materials. – 2022. – No. 1–2 (799). – P. 11–20.
3. Kovalevsky, V.V. The structure of shungite carbon / V.V. Kovalevsky // Journal of Inorganic Chemistry. – 1994. – No. 39. P. 28–32.
4. Beregovoy, V.A. Highly functional concretes in machine tool construction: technological aspects of application / V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – No. 4. – P. 18–26.
5. Online resource <https://robot-mosaic.com/product.html/> date of application 09/19/2024/

УДК 697.7

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник научно-
исследовательского сектора
E-mail: ambereg@rambler.ru

Присевка Александр Сергеевич,
аспирант
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 Aleksandr Marcovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Chief Researcher of the Research Sector
E-mail: ambereg@rambler.ru

Prisevka Aleksandr Sergeevich,
Postgraduate
E-mail: techbeton@pguas.ru

ВОЗДУХООБМЕН ПОМЕЩЕНИЙ МНОГОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ

А.М. Береговой, А.С. Присевка

По результатам проведенных натурных обследований многоэтажных зданий отмечены недостатки проектирования, монтажа и эксплуатации системы естественной вентиляции, снижающие воздухообмен помещений и экологическое состояние воздуха помещений. Выполнен анализ эффективности воздухообмена в помещениях квартир по высоте здания и при различной планировке квартир на уровне этажа. Дана оценка объемов инфильтрующегося воздуха через наружные стены с различным сопротивлением воздухопроницанию по сравнению с нормативным притоком воздуха для жилого помещения. Показано, что относительно воздухопроницаемые конструкции наружных ограждений могут значительно улучшить воздухообмен помещений при использовании стеклопакетов, отличающихся высокой герметичностью, в условиях эпизодического притока воздуха через эти конструкции.

Ключевые слова: воздухообмен помещений, естественная вентиляция, ограждающие конструкции, воздухопроницаемость

AIR EXCHANGE OF ROOMS IN MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING

A.M. Beregovoy, A.S. Prisevka

According to the results of field surveys of multi-storey buildings were noted shortcomings in the design, installation and operation of the natural ventilation system, what is the reason for the decrease of air exchange of rooms and the environmental condition of the indoor air. The analysis of the air exchange efficiency in the rooms according to the height of the building and with different layouts of apartments at floor level was performed. There was estimated the volume of infiltrating air through external walls with different air permeability resistance compared with the standard air inflow for residential rooms. The volume of infiltrating air through external walls with different air permeability resistance was estimated, compared with the standard air inflow. It was shown, that relatively breathable structures of external walls can significantly improve the air exchange of rooms, when using glass packet, characterized by high tightness, under conditions of episodic air flow through these structures.

Keywords: indoor air exchange, natural ventilation, enclosing structures, breathability

По данным опубликованных исследований около 50 % всего эксплуатируемого жилого массива подвержено так называемому синдрому больных зданий («Sick House»). Внутренний воздух таких зданий, особенно в плохо вентилируемых зонах помещений, по сравнению с наружным в среднем в 5 раз грязнее и в 9 раз токсичнее: в нем присутствует такая болезнетворная микрофлора, как споры грибов, пылевые

клещи, кишечная палочка и др., а также разные токсические вещества (фенол, бензол, формальдегид и др.). Воздействие спёртого воздуха внутри помещений на организм человека, по данным Всемирной организации здравоохранения, является одной из причин большого количества тяжелых заболеваний и смертей. Результаты исследований системы естественной вентиляции зданий как важнейшего фактора влияния на микроклимат помещений приведены в работах [1–3].



Рис. 1. Обследованные многоэтажные здания серии 125

В задачу настоящего исследования входит оценка эффективности воздухообмена в помещениях квартир с естественной системой вентиляции, расположенных на различных этажах и имеющих различную планировку.

Проведенный анализ основывался на результатах натуральных обследований тепловой защиты многоэтажных жилых зданий г. Пензы (рис. 1) [4]. В зданиях предусмотрена естественная система вентиляции с притоком воздуха через открываемые створки окон и вытяжкой воздуха через каналы в сборных вентиляционных блоках.

При проведении обследований зданий отмечены многочисленные случаи неправильной эксплуатации системы естественной вентиляции помещений, а также наличие строительных дефектов при ее устройстве (табл. 1). Выполнен анализ эффективности воздухообмена в помещениях квартир по высоте здания и при различном расположении квартир на уровне этажа.

Т а б л и ц а 1

Факты неправильной эксплуатации системы естественной вентиляции помещений и строительные дефекты при ее устройстве

№ п/п	Воздухообмен	
	причины ухудшения	оценка эффективности
Ошибки при эксплуатации системы естественной вентиляции		
1	Неправильная эксплуатация приточных устройств в конструкциях стеклопакетов	Эпизодически, а не постоянно открытые створки стеклопакетов снижают воздухообмен помещений
2	Примыкание к вытяжным отверстиям зонтов в кухнях и вентиляторов в санузлах	Происходит блокировка воздухообмена в ниже- и вышерасположенных квартирах
3	Недостаточно герметичный притвор как наружных дверей в здание, так и дверей в квартиры	Отработанный воздух попадает из помещений нижних этажей в помещения верхних по лестничной клетке и шахте лифта
Строительные дефекты при устройстве системы естественной вентиляции		
1	Некачественная герметизация пространства теплого чердака и примыканий канализационных стояков к чердачной вентиляционной шахте (в домах другой серии)	Ухудшение воздухообмена и экологического состояния воздуха жилых помещений. Появление посторонних запахов из соседних квартир и санузлов при возникновении обратной тяги
2	Недостаточная герметичность стыковых соединений сборных вентиляционных блоков. Часть вытяжных отверстий входят в каналы, предназначенные для других квартир	Снижение эффективности воздухообмена в помещениях квартир по высоте здания. Блокировка воздухообмена в другой группе квартир

По высоте многоэтажного здания на воздухообмен квартир в нижней его части в соответствии с эпюрой избыточного давления влияет процесс инфильтрации, в результате которого в помещения поступает свежий наружный воздуха. Однако выше нейтральной оси в верхней части дома переток отработанного воздуха из нижних этажей, приводящий к его эксфильтрации, существенно снижает эффективность системы естественной вентиляции, что ухудшает экологическое состояние внутренней среды помещений этих квартир.

На уровне этажа в квартирах с помещениями, ориентированными на одну сторону горизонта, по данным инструментальных замеров отмечен минимальный воздухообмен (рис. 2,а), что приводит к накоплению болезнетворной микрофлоры в застойных зонах внутреннего пространства. При ориентации помещений квартиры на противоположные стороны горизонта обеспечивается более активная аэрация по принципу сквозного проветривания.

Инструментальные замеры установили, что воздухообмен в помещениях различных квартир составляет только 35–46 % от нормативного значения. Основная причина этого, как показали визуальные осмотры фасадов зданий, заключалась в том, что створки для проветривания в большинстве конструкций окон из стеклопакетов были закрыты или установлены в микрощелевое положение.

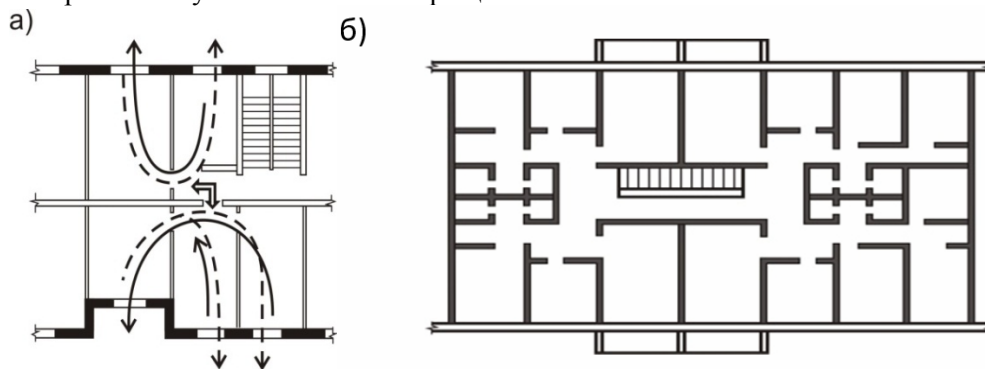


Рис. 2. Способы проветривания и расположения квартир при различных планировочных схемах жилой секции:

а – одностороннее проветривание помещений квартир; б – двухстороннее расположение квартир

Неправильная эксплуатация системы естественной вентиляции и строительные дефекты при ее устройстве вызвали повышение относительной влажности воздуха в отдельных квартирах и появление на внутренней поверхности наружных стен влажных пятен и грибковой плесени, а также ухудшение экологических параметров внутренней среды проживания. При проведении обследований в холодный период года отмечены случаи возникновения обратной тяги из вытяжных каналов вентблоков и появления на поверхности этих блоков конденсата. Возникновение обратной тяги, которая интенсифицируется при сильном ветре, также связано со слабым притоком воздуха через створки окон, в результате чего более тяжёлый холодный воздух с поверхности крыши опускается вниз через отверстия оголовников вентблоков, блокируя таким образом вытяжку отработанного воздуха.

Результаты обследований подтвердили, что применение в массовом строительстве жилых зданий стеклопакетов с высокой герметичностью стало одной из основных причин повышения относительной влажности внутреннего воздуха и ухудшения его экологических показателей.

На воздухообмен помещений определенное влияние оказывает и воздухопроницаемость наружных ограждающих конструкций. Для оценки этого влияния были выполнены расчеты объема инфильтрующегося воздуха $W_{инф}$ через конструкции наружных стен с различной величиной сопротивления воздухопроницанию $R_{и}$, ($м^2 \cdot ч \cdot Па$)/кг.

Расчет проводился для 12-этажного жилого здания со следующими исходными данными: разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях стен

$\Delta p=45$ Па; скорость ветра $v = 5,6$ м/с, конструктивные схемы двухслойных и однослойных стен (1 – плотный наружный слой из цементно-песчаной штукатурки толщиной 15 мм по относительно воздухопроницаемому конструктивному слою с величиной $R_{и}=371$; 2 – однослойная монолитная конструкция из автоклавного пенобетона толщиной 100 мм с величиной $R_{и} = 2000$; 3 – керамзитобетон толщиной 250–400 мм, $\gamma=1000$ кг/м³ с величиной $R_{и}=53-80$; 4 – шлакобетон без швов толщиной 300 мм с величиной $R_{и}=42$; 5 – кирпичная кладка толщиной от 250 мм на цементно-песчаном растворе со слоем сухой штукатурки при величине $R_{и}=18$; 6 – газосиликат без швов толщиной 280 мм с величиной $R_{и} = 42$).

Результаты расчета показаны в табл. 2. Относительно воздухопроницаемые конструкции стен по схемам 4–6 оказывают заметное влияние на воздухообмен помещений. Так, например, количество инфильтрующегося воздуха со стенами из шлакобетона без швов может составить 1/5, а из кирпичной кладки – почти 1/2 от нормативной величины воздухообмена. Отсюда можно сделать вывод, что в условиях широкомасштабного применения герметичных окон из стеклопакетов и эпизодического открывания их створок для проветривания такие относительно воздухопроницаемые конструкции наружных стен значительно улучшают воздухообмен помещений, а следовательно, и экологическое состояние внутренней воздушной среды.

Результаты проведенных натурных обследований и расчет воздухопроницаемости наружных стен подтвердили необходимость улучшения качества монтажа и эксплуатации системы естественной вентиляции многоэтажных жилых зданий, а также важность более широкого использования инновационных разработок в системе вентиляции зданий, например таких, как приточные стеновые клапаны и аэроматы.

Т а б л и ц а 2

Количество инфильтрующегося воздуха через наружную стену площадью 8,5 м² по схемам 1–6 для жилого помещения площадью 12 м²

№ схем	1	2	3	4	5	6
Величина $W_{инф}$, кг/ч (% от норматива)	1,02 (2,36)	0,20 (0,46)	2,0-4,76 (4,63-11,0)	9,10 (21,1)	21,3 (49,2)	9,10 (21,1)

Кардинальным решением проблем естественной вентиляции эксплуатируемых многоэтажных жилых зданий является ее переделка в эффективную, хотя и более дорогостоящую по устройству и обслуживанию механическую систему в виде гибридной вентиляции с центральным вытяжным вентилятором на крыше каждой жилой секции дома.

Список литературы

1. Бодров, М.В. О фактах эффективной работы систем естественной вентиляции / М.В. Бодров, В.Ю. Кузин, Е.М. Прыткова, АФ. Юланова // Жилищное строительство. – 2022. – №1(2). – С.3–8.
2. Вытчиков, Ю.С. Исследование влияния инфильтрации наружного воздуха на теплозащитные характеристики наружных стен высотных зданий / Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарев, А.Б. Костуганов // Градостроительство и архитектура. – 2020. – Т.10, №1(38). – С.30–35.
3. Пастушков, П.П. Воздухопроницаемость минераловатных изделий современного производства / П.П. Пастушков, В.Г. Гагарин // Строительные материалы. – 2021. – № 6. – С. 15–20.
4. Береговой, А.М. Показатели микроклимата и воздухообмена в объемно-планировочной структуре многоэтажного жилого дома / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №2. – С. 72–77.

References

1. Bodrov, M.V. On the facts of effective operation of natural ventilation system / M.V. Bodrov, V.Yu. Kuzin, E.M. Prytkova, A.F. Yulanova // Housing construction. – 2022. – No. 1–2. – P.3–8.
2. Vytchikov, Yu.S. Investigation of the effect of infiltration of outdoor air on the heat-protective characteristics of the exterior walls of high-rise buildings / Yu.S. Vytchichkov, M.E. Saparev, A.B. Kostuganov // Urban development and architecture. – 2020. – Vol.10, No.1(38). – P.30–35.
3. Pastushkov, P.P. Breathability of mineral wool products of modern production / P.P. Pastushkov, V.G. Gagarin // Building materials. – 2021. – No. 6. – P. 15–20.
4. Beregovoy, A.M. Indicators of microclimate and air exchange in the space-planning structure of a multi-storey residential building / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy // Regional architecture and engineering. – 2021. – No.2. – P. 72–77.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Сафин Роман Борисович,
студент
e-mail: gds@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

Gracheva Yulia Vyacheslavovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the
Department «Geotechnics and Road Construction»
E-mail: gds@pguas.ru

Safin Roman Borisovich,
Student
E-mail: gds@pguas.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Ю.В. Грачева, Р.Б. Сафин

Качественное проведение испытаний в приборе трехосного сжатия для определения прочностных и деформационных характеристик грунтов подразумевает моделирование напряженного состояния грунта в процессе его испытания. Такие испытания проводятся методом трехосного сжатия с анизотропной консолидацией по ГОСТ 12248.3-2020. Для этого необходимо определить значение горизонтальных напряжений, действующие на глубине отбора пробы. В статье приведена методика испытания грунтов в лабораторных условиях по установлению коэффициента, учитывающего взаимосвязь между горизонтальными и вертикальными напряжениями в массиве грунта.

Ключевые слова: грунт, метод трехосного сжатия, анизотропная консолидация, горизонтальные напряжения, вертикальные напряжения

DETERMINATION OF THE LATERAL PRESSURE COEFFICIENT IN TRIAXIAL TESTS

Yu.V. Gracheva, R.B. Safin

Qualitative testing in a triaxial compression device to determine the strength and deformation characteristics of soils implies modeling the stressed state of the soil during its testing. Such tests are carried out by the method of triaxial compression with anisotropic consolidation according to GOST 12248.3-2020. To do this, it is necessary to determine the value of the horizontal stresses acting at the sampling depth. The article presents a methodology for testing soils in laboratory conditions to establish a coefficient that takes into account the relationship between horizontal and vertical stresses in the soil mass.

Keywords: soil, triaxial compression method, anisotropic consolidation, horizontal stresses, vertical stresses

В массиве грунты могут находиться в нормально-уплотненном, недоуплотненном и переуплотненном состояниях. Данный факт необходимо учесть при выполнении испытаний в лаборатории методом трехосного сжатия с анизотропной консолидацией по регламентированной методике [3]. Трудность состоит в определении начального напряженного состояния в массиве грунта. Значения вертикальных напряжений от собственного веса на глубине отбора пробы определяет проектировщик с помощью эпюры природных давлений. Неясным остается вопрос, следует ли принять горизонтальные напряжения больше, меньше или равными вертикальным напряжениям во время проведения испытания. Достоверно значение горизонтальных напряжений от собственного веса грунта на глубине отбора пробы можно определить полевыми

методами [2, 4] с помощью прессиометра или дилатометра. Найденные значения горизонтальных напряжений передаются в лабораторию для проведения анизотропной консолидации при заданном значении коэффициента бокового давления K_0 . К сожалению, полевые испытания по определению K_0 проводятся крайне редко.

Коэффициент бокового давления связывает между собой горизонтальные и вертикальные напряжения в массиве грунта. Его можно определить и по эмпирическим формулам. Но каждая эмпирическая зависимость имеет границы применимости. Например, формула Яку $K_0=1 - \sin\varphi$ используется только для нормально уплотненных несвязных грунтов.

Формула Р. Мауне $K_0=(1 - \sin\varphi)\cdot OCR^{\sin\varphi}$ зависит от значения коэффициента переуплотнения OCR. Параметры, определяемые косвенными методами по эмпирическим зависимостям, допускается использовать при проектировании только сооружений простой геотехнической категории.

Коэффициент бокового давления может быть определен в лаборатории в трехосных приборах. Данная схема испытаний была предложена в 1957 г А. Bishop [1]. Испытания проводятся в приборе трехосного сжатия, в камере типа Б, заполненной дегазированной дистиллированной несжимаемой водой без возможности ее дальнейшего оттока из камеры. В этом случае вода начинает вести себя, как твердое тело. И при приложении вертикальных напряжений к образцу в камере будут развиваться горизонтальные напряжения, которые можно измерить по давлению жидкости в камере. А значит, и определить значение коэффициента бокового давления K_0 .

Цель работы – адаптировать методику определения коэффициента бокового давления при трехосных испытаниях в учебном процессе, что позволит проводить качественные испытания методом трехосного сжатия с анизотропной консолидацией при заданном значении K_0 .

Испытанию в трехосном приборе с камерой типа Б подвергались образцы грунта ненарушенного сложения естественной влажности. Исследуемый грунт представлен суглинком мягкопластичным непросадочным ненабухающим. Образец-цилиндр диаметром 50 мм и высотой 100 мм установили в камеру типа Б (см. рис. 1), обтянули эластичной резиновой оболочкой, отделив боковую поверхность образца от рабочей жидкости камеры. Камеру заполнили дегазированной водой и приступили к испытанию при закрытом дренаже.

Испытание провели по консолидированно-дренированной схеме, включающей подготовительный этап и этап непосредственного испытания. На этапе подготовки провели реконсолидацию грунта для восстановления его природного фазового состава путем всестороннего обжатия образца давлением $\sigma = 50$ кПа. При достижении стабилизации давления на этапе реконсолидации перешли к консолидации образца приложением дополнительного бокового давления $\sigma = 100$ кПа с ожиданием стабилизации бокового давления и вертикальной деформации. Осуществив предварительную подготовку образца, приступили ко второму этапу испытания, создавая девиаторное нагружение, увеличивая вертикальную нагрузку с постоянной скоростью 0,05 мм/мин.

Подробная схема испытания представлена на рис. 1.

В качестве графического отображения испытания получили зависимость между вертикальным давлением σ_1 и давлением в камере σ_3 , которая представлена на рис. 2.

Обработка результатов испытания позволила определить значение механической характеристики грунта – коэффициента бокового давления K_0 в д.е. (см. таблицу).

Механические характеристики грунта

Давление обжатия σ_3 , МПа	Вертикальное давление реконсолидации σ_1 , МПа	Боковое давление реконсолидации σ_3 , МПа	Вертикальное перемещение h , мм	Коэффициент бокового давления K_0 , д.е.
0,10	1,071	0,197	19,553	1,000

Схема испытания

Укажите параметры запускаемого испытания

Схема нагружения | Параметры образца

Предварительное обжатие

Давление предварительного обжатия: 100 кПа

Время стабилизации вертикальной деформации: 00:15:00 сут.ч.мм.сс

Стадия водозаложения:

Реконсолидация

Вертикальное давление реконсолидации: 140 кПа

Ожидать стабилизацию бокового давления:

Ожидать стабилизацию вертикальной деформации:

Критерий стабилизации давления: 5 кПа

Время стабилизации давления: 00:05:00 сут.ч.мм.сс

Критерий стабилизации вертикальной деформации: 0,05 %

Критерий стабилизации вертикальной деформации: 0,01 мм

Время стабилизации вертикальной деформации: 00:15:00 сут.ч.мм.сс

режим нагружения

кинематическое

непрерывное

Скорость вертикальной деформации: 0,04 мм / мин

Время приложения нагрузки: 01:30:00 сут.ч.мм.сс

« Назад | Далее » | Отмена

Рис. 1. Схема испытания образцов в камере типа Б по установлению коэффициента бокового давления K_0

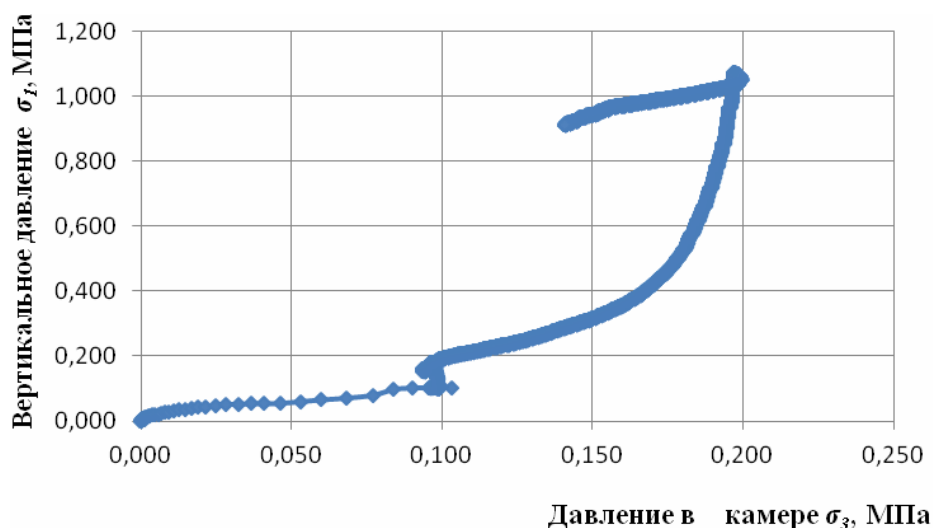


Рис. 2. Зависимость «Вертикальное давление σ_1 – давление в камере σ_3 »

Полученные значение коэффициента бокового давления $K_0 = 1,0$ свидетельствует о том, что на грунт в массиве действует равное всестороннее давление, т.е. вертикальные напряжения равны горизонтальным. Данный коэффициент доказывает адекватность полученных результатов испытаний.

Таким образом, проведение трехосных испытаний с анизотропной консолидацией при заданном значении K_0 – единственный на данный момент апробированный метод определения коэффициента бокового давления в покое. Без данного параметра невозможно воспроизведение исходного напряженного состояния [4].

Список литературы

1. Бишоп, А.У. Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях / А.У. Бишоп, Д.Д. Хенкель; пер. с англ. проф. д-ра техн. наук Г.И. Тер-Степаняна; под общ. ред. проф. д-ра геол.-минералогич. наук Н.Я. Денисова. – М.: Госстройиздат, 1961. – 231 с.

-
2. Болдырев, Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010: монография / Г.Г. Болдырев. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: ООО «Прондо», 2014. – 812 с.
 3. ГОСТ 12248.3-2020. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. – М.: Стакдартинформ, 2020.
 4. Мирный, А.Ю. K_0 -консолидация в камерах трехосного сжатия / А.Ю. Мирный, И.Х. Идрисов. – URL: Geoinfo.ru.

References

1. Bishop, A.U. Determination of soil properties in triaxial tests / A.U. Bishop, D.D. Henkel; Translated from English by Prof. Dr. of Sciences G.I. Ter-Stepanyan; Under the general editorship of Prof. Dr. Geol.-mineralogical Sciences N.Ya. Denisova. – М.: Gosstroyizdat, 1961. – 231 p.
2. Boldyrev, G.G. Methods for determining the mechanical properties of soils with comments to GOST 12248-2010: monograph / G.G. Boldyrev. – 2nd ed., add. and ispr. – М.: LLC «Прондо», 2014. – 812 p.
3. GOST 12248.3-2020. Determination of strength and deformability characteristics by the triaxial compression method. – М.: Stackdartinform, 2020.
4. Mirny, A.Yu. K_0 -consolidation in three-axis compression chambers / A.Yu. Mirny, I.Kh. Idrisov. – URL: Geoinfo.ru.

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

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

Коровкин Марк Олимпиевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Харнаев Андрей Вячеславович,
аспирант
E-mail: spectr_321@mail.ru

Шульте Ирина Сергеевна,
студент магистратуры
E-mail: irina13122000@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

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

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

Kharnaev Andrey Vyacheslavovich,
Graduate student
E-mail: spectr_321@mail.ru

Shulte Irina Sergeevna,
Master's degree student
E-mail: irina13122000@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ БЕТОННОГО ЛОМА В ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОПОЛИМЕРНОГО БЕТОНА

Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, А.В. Харнаев, И.С. Шульте

Рассмотрена перспективность использования геополимерных бетонов, изготовленных с применением вторичных заполнителей на основе продуктов переработки бетонного лома, для развития технологий экономики замкнутого цикла в строительной индустрии. Приведены результаты исследования свойств геополимерного бетона на вторичном щебне, а также щебня из гранита, известняка и доломита. Установлено, что при замещении природного заполнителя на рециклинговый прочность бетона снижается на 5-6 %. Показано, что при замене гранитного щебня на заполнитель из бетонного лома водопоглощение бетона повышается на 1,2 %.

Ключевые слова: геополимерный бетон, бетонный лом, вторичный щебень, замещение природного щебня, подвижность смеси, прочность, водопоглощение.

THE USE OF SCRAP CONCRETE PROCESSING PRODUCTS IN THE PRODUCTION OF GEOPOLYMER CONCRETE

N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin, A.V. Kharnaev, I.S. Schulte

The prospects of using geopolymer concretes made using secondary aggregates based on scrap concrete processing products for the development of closed-cycle economics technologies in the construction industry are considered. The results of a study of the properties of geopolymer concrete on secondary crushed stone, as well as crushed stone from granite, limestone and dolomite. It was found that when replacing natural aggregate with recycled concrete, the strength of concrete decreases by 5-6 %. It is shown that when granite rubble is replaced with a filler made of concrete scrap, the water absorption of concrete increases by 1.2 %.

Keywords: geopolymer concrete, concrete scrap, secondary crushed stone, replacement of natural crushed stone, mobility of the mixture, strength, water absorption

Введение

Геополимерные вяжущие – одни из наиболее перспективных материалов, обеспечивающих прогресс в создании и развитии технологий промышленного метаболизма и экономики замкнутого цикла в строительной индустрии [1]. Перспективность этих вяжущих основана на возможности использования в их технологии алюмосиликатных промышленных отходов, которые в процессе образования подвергались высокотемпературным воздействиям и при активации проявляют вяжущие свойства [2]. К числу таких промышленных отходов относятся прежде всего доменные шлаки и золы ТЭС.

Одним из важных направлений развития технологии использования отходов в производстве геополимеров является замещение природных заполнителей отходами сноса зданий и производства строительных материалов, в частности переработанным бетонным ломом. Отмечается [3], что из-за низких характеристик продукты дробления бетонного лома в производстве строительных материалов не применяются, а используются преимущественно в дорожном строительстве.

Авторы работы [4] показали, что замена природного заполнителя дробленным бетонным ломом после термомеханической обработки такого заполнителя с целью снижения содержания в нем цементного камня позволяет повысить механические свойства геополимерного бетона. По данным [5], наличие пористого цементного камня во вторичном заполнителе приводит к снижению прочности геополимерного бетона из-за минералогических изменений (кристаллизации) геополимерного вяжущего в зоне контакта с заполнителем.

Установлено, что геополимерный бетон, изготовленный с применением вторичного щебня (дробленого бетонного лома), имеет более высокую прочность в сравнении с бетоном на высококачественном щебне [6], что с точки зрения утилизации строительных отходов выгодно отличает геополимерный бетон от обычного бетона и делает его ценным материалом для развития технологий замкнутого цикла.

Однако, несмотря на то что использование геополимерных материалов в строительстве позволяет сохранить природные ресурсы и сократить темпы роста полигонов и свалок, а также на другие технологические и эксплуатационные преимущества этих материалов, они пока не находят широкого применения. Основной причиной сложившегося положения является недостаточная изученность свойств этих материалов, в частности их долговечности.

В связи с этим было исследовано влияние различных крупных заполнителей геополимерного бетона на его прочность и водопоглощение.

Материалы и методы исследования

В качестве крупного заполнителя был использован щебень фр. 5-10, изготовленный из гранита, известняка, доломита и бетонного лома. Гранитный щебень имел марку по дробимости 1400, известняковый – 800, доломитовый – 1000, а вторичный – 600.

Бетонный лом, предназначенный для дробления на щебень, был получен при реконструкции цокольного этажа общественного здания, построенного в начале 60-х годов прошлого века. В связи с тем что после дробления бетонного лома в лабораторной щековой дробилке продукты дробления содержали большое количество зерен лещадной формы, перерабатываемый бетон подвергался трехкратному дроблению по мягкому режиму [7]. При таком режиме дробление происходит при максимально открытой разгрузочной щели дробилки «под завалом», что позволяет уменьшить содержание лещадных зерен в результате дробления «камень о камень».

Средняя плотность полученного рециклингового щебня – 2370 кг/м³, водопоглощение – 6,4 %. На рис. 1 видно, что исследованный щебень преимущественно состоит из растворной части бетона.



Рис. 1. Исследованный вторичный щебень фр. 5-10 мм

Объемное содержание крупного заполнителя во всех исследованных составах было постоянным – 43 %. Из-за того что плотности использованных заполнителей различались, их расходы по массе также различались.

Для приготовления бетонной смеси применялся речной полевошпатовый песок с модулем крупности 1,9 и средней плотностью 2610 кг/м³.

В качестве вяжущего использовались смесь пылевидных фракций отсева дробления гранитного щебня и доменный гранулированный шлак, измельченные в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности 350 и 380 м²/кг соответственно. Содержание шлака в смешанном вяжущем составляло 30 %. Для активации твердения вяжущего применялось натриевое жидкое стекло с силикатным модулем 1,6.

Исследованные составы бетона приведены в таблице.

Составы бетона с различными видами крупного заполнителя

Наименование компонента бетона	Расход компонента, кг/м ³			
	№1	№2	№3	№4
Вяжущее	411			
Песок	832			
Гранитный щебень	816	–	–	–
Вторичный щебень	–	708	–	–
Известняковый щебень	–	–	769	–
Доломитовый щебень	–	–	–	864
Активатор	126			
Вода	127			

Оценка консистенции бетонной смеси производилась согласно методике ГОСТ 310.4-81 по расплыву смеси на встряхивающем столике. Из бетонной смеси формовались образцы размером 40×40×160 мм, которые прогревались в условиях, исключающих потерю влаги, по режиму: предварительная выдержка – 14 ч, нагрев до температуры 80 °С – 2 ч, изотермическая выдержка – 8 ч, остывание – 14 ч. Для выявления влияния продолжительности прогрева на прочность исследованных составов часть образцов дополнительно проходила 1 или 2 цикла прогрева по указанному выше режиму, но без предварительной выдержки.

Результаты и их обсуждение

Анализ диаграммы на рис. 2 показывает, что консистенция смесей зависит от вида заполнителя. Статистический анализ данных позволил установить, что расплыв смеси, приготовленной с применением заполнителей, практически не имеющих водопоглощения, линейно зависит от плотности смеси (рис. 3). Полученная зависимость характеризуется высоким значением коэффициента корреляции – 0,98. Отклонение от установленной зависимости расплыва смеси (см. рис. 2), приготовленной с применением рециклингового заполнителя, в сторону увеличения сложно объяснить. В связи со значительным водопоглощением использованного вторичного щебня поглощение его порами жидкой фазы из геополимерной бетонной смеси должно приводить не к повышению подвижности смеси, а к ее снижению.

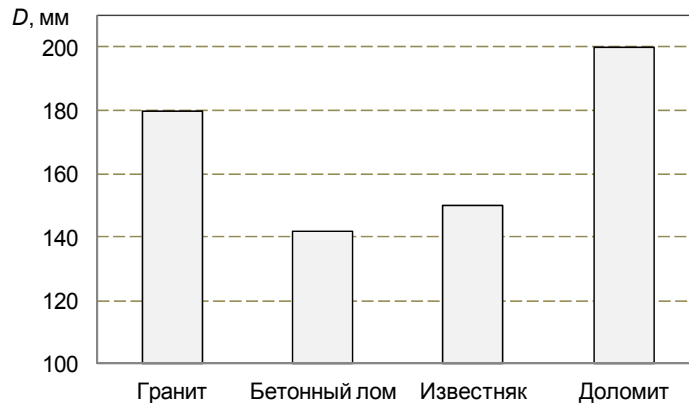


Рис. 2. Влияние вида заполнителя на расплыв смеси

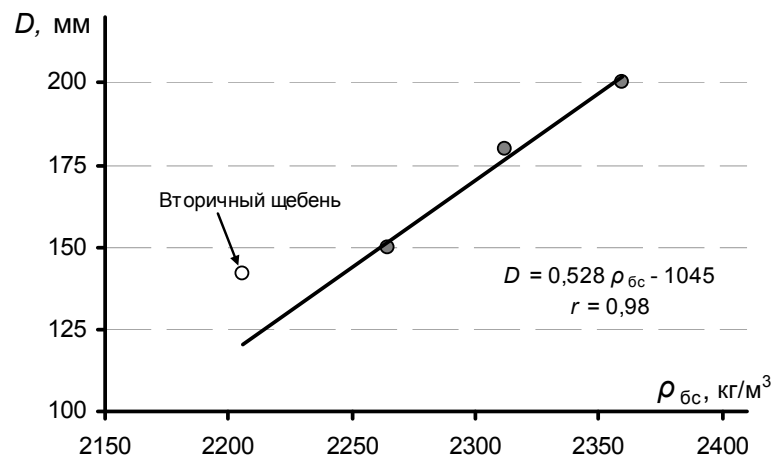


Рис. 3. Влияние плотности бетонной смеси ρ на расплыв конуса D

Определение прочности бетона на сжатие после различного количества циклов тепловой обработки (рис. 4) показало, что после 1 цикла эта характеристика геополимерного бетона на вторичном заполнителе приблизительно на 20 % ниже прочности составов, приготовленных на других исследованных заполнителях. При этом после 2 циклов прогрева значения прочности бетона на исследованных заполнителях отличаются не более чем на 1,2 МПа, а итоговые значения прочности бетона (после 3 циклов тепловой обработки) ниже прочности бетона на природных заполнителях на 1,4-2,2 МПа. Это снижение прочности составляет 5-6 % от прочности бетона, изготовленного с применением щебня из горных пород.

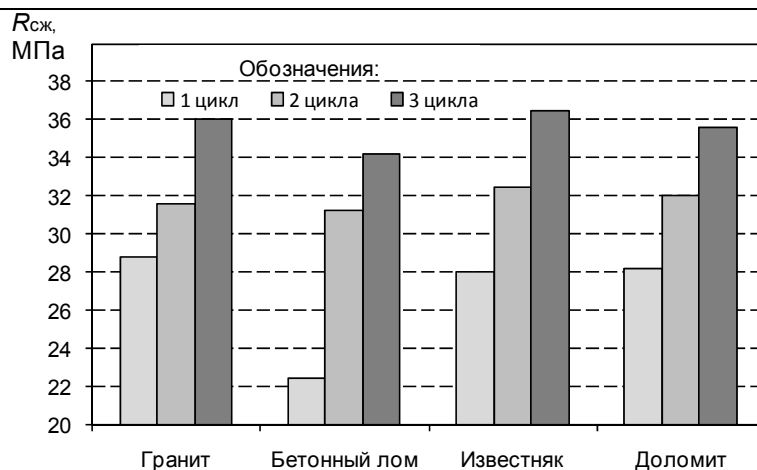


Рис. 4. Влияние вида щебня и количества циклов тепловой обработки на прочность бетона на сжатие $R_{сж}$

Снижение прочности бетона при замене природного щебня на рециклинговый заполнитель нельзя объяснить только низкой прочностью такого заполнителя. Возможно, что для процесса структурообразования геополимерного бетона немаловажное значение имеет инфильтрация активатора твердения из геополимерного теста в поровое пространство вторичного щебня, в результате этого процесс твердения замедляется. При увеличении продолжительности твердения протекает обратный процесс – активатор твердения переносится в геополимерный камень, который в результате увеличения количества активатора дополнительно набирает прочность. Кроме этого происходит упрочнение контактной зоны пористого компонента заполнителя.

Исследование кинетики водопоглощения геополимерного бетона в течение 5 сут показало, что он в отличие от цементного бетона быстро насыщается водой. Количество воды, поглощенной за 15 мин, отличается от водопоглощения через 5 суток не более чем на 0,5 % (см. рис. 5). При этом итоговое водопоглощение исследованных составов невелико – 4,2-5,7 %.

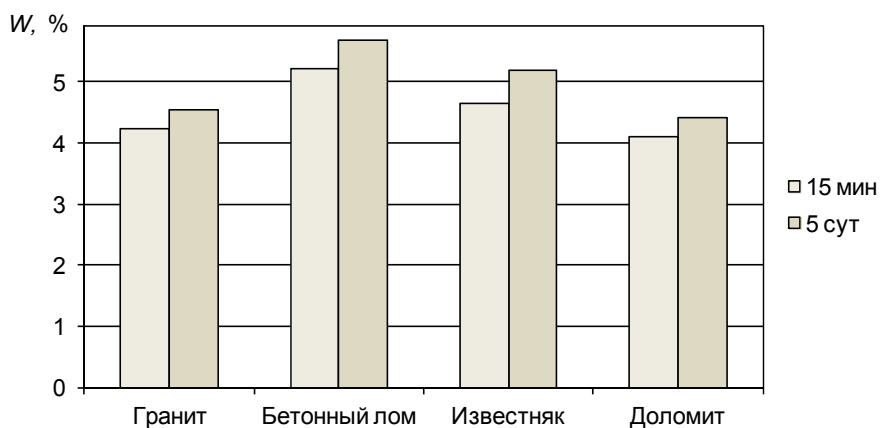


Рис. 5. Водопоглощение бетона, изготовленного с применением различных видов щебня, через 15 мин и 5 сут экспозиции в воде

Между водопоглощением исследованных составов геополимерного бетона и их плотностью установлена корреляционная зависимость. Коэффициент корреляции этой зависимости значительно возрастает, если не учитывать данные по водопоглощению бетона на вторичном заполнителе. Отклонение от корреляционной зависимости бетона на рециклинговом заполнителе обусловлено пористостью такого заполнителя, который в отличие от использованных плотных заполнителей поглощает воду так же, как и окружающая его геополимерная матрица бетона.

Выводы

Установлено, что при замене гранитного, известнякового или доломитового щебня на рециклинговый щебень подвижность геополимерной бетонной смеси снижается вследствие низкой плотности бетонного лома. При этом водопоглощение вторичного заполнителя не оказывает негативного влияния на подвижность исследованной геополимерной бетонной смеси.

Замещение щебня из горных пород вторичным заполнителем приводит к снижению прочности геополимерного бетона, особенно при небольшой продолжительности твердения под воздействием тепловой обработки, однако при увеличении продолжительности твердения снижение прочности составляет всего 5-6 %.

Водопоглощение исследованных составов бетона составляет 4,2-5,7 %. Установлено, что геополимерный бетон характеризуется быстрым насыщением водой. Эта особенность должна быть исследована с точки зрения ее влияния на долговечность бетона при воздействии коррозионных веществ и морозного разрушения. Применение вторичного щебня на основе продуктов переработки бетона повышает водопоглощение исследованных составов на не более чем 1,2 %.

Проведенные исследования показали перспективность использования продуктов переработки бетонного лома в качестве вторичного щебня при производстве геополимерного бетона.

Список литературы

1. Nodehi, M. Alkali-activated materials and geopolymer: a review of common precursors and activators addressing circular economy / M. Nodehi, V. M. Taghvaei // *Circular Economy and Sustainability*. – 2022. – Vol. 2, №. 1. – P. 165–196.
2. Davidovits, J. Geopolymer chemistry and applications / J. Davidovits. – 5th edition. – France, Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2020. – 680 p.
3. Морозова, Н.Н. Бетонные отходы: организация переработки, свойства и применение / Н.Н. Морозова, А.Р. Гиззатуллин, А.П. Аксаков, К.О. Нестерова // *Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал*. – 2022. – № 1(10). – С. 32–46.
4. Pawluczuk, E. Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior / E. Pawluczuk, K. Kalinowska-Wichrowska, J.R. Jimenez, J.M. Fernández-Rodríguez, D. Suescum-Morales // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 44. – P. 103317.
5. Zhu, H. The effects of phase changes on the bonding property of geopolymer to hydrated cement / H. Zhu, Z. Zhang, F. Deng, Y. Cao // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol. 48. – P. 124–130.
6. Ерошкина, Н.А. Влияние материала крупного заполнителя на прочностные характеристики геополимерного бетона / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. – 2021. – № 2(13). – С. 28–33.
7. Коровкин, М.О. Использование дробленого бетонного лома в качестве заполнителя для самоуплотняющегося бетона / М.О. Коровкин, А.И. Шестернин, Н.А. Ерошкина // *Инженерный вестник Дона*. – 2015. – № 3(37). – С. 85.

References

1. Nodehi, M. Alkali-activated materials and geopolymer: a review of common precursors and activators addressing circular economy / M. Nodehi, V. M. Taghvaei // *Circular Economy and Sustainability*. – 2022. – Vol. 2, №. 1. – P. 165–196.
2. Davidovits, J. Geopolymer chemistry and applications / J. Davidovits. – 5th edition. – France, Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2020. – 680 p.
3. Morozova, N.N. Concrete waste: organization of processing, properties and application / N.N. Morozova, A.R. Gizzatullin, A.P. Aksakov, K.O. Nesterova // *Polymers in construction: scientific online journal*. – 2022. – № 1(10). – P. 32–46.

4. Pawluczuk, E. Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior / E. Pawluczuk, K. Kalinowska-Wichrowska, J.R. Jimenez, J.M. Fernández-Rodríguez, D. Suescum-Morales // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 44. – P. 103317.

5. Zhu, H. The effects of phase changes on the bonding property of geopolymer to hydrated cement / H. Zhu, Z. Zhang, F. Deng, Y. Cao // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol. 48. – P. 124–130.

6. Eroshkina, N.A. The influence of coarse aggregate material on the strength characteristics of geopolymer concrete / N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin // *Bulletin of PGUAS: construction, science and education*. – 2021. – № 2(13). – P. 28–33.

7. Korovkin, M.O. The use of crushed concrete scrap as a filler for self-sealing concrete / M.O. Korovkin, A.I. Shesternin, N.A. Eroshkina // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2015. – № 3(37). – P. 85.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Лавров Иван Юрьевич,
аспирант
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,
Postgraduate student
E-mail: techbeton@pguas.ru

РАЗРАБОТКА СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С ЗАДАННЫМИ УСАДОЧНЫМИ И ДИНАМИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

И.Ю. Лавров

Представлены результаты исследования эффективности совместного действия противоусадочных добавок для бетона различного механизма действия – расширяющейся добавки на основе сульфоалюмината кальция и добавки, редуцирующей поверхностное натяжение жидкости в капиллярных порах цементного камня. По результатам двухфакторного эксперимента получены математические модели зависимостей физико-механических и динамических характеристик мелкозернистого бетона от содержания добавок.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, усадка, демпфирование, расширяющаяся добавка, поверхностное натяжение, компенсация усадки

DEVELOPMENT OF A FINE-GRAINED CONCRETE COMPOSITION WITH SPECIFIED SHRINKAGE AND DYNAMIC CHARACTERISTICS

I.Yu. Lavrov

The article presents the results of a study of the effectiveness of the combined action of anti-shrinkage additives for concrete of different mechanisms of action – expanding based on calcium sulfoaluminate and an additive reducing the surface tension of the liquid in the capillary pores of cement stone. Based on the results of a two-factor experiment, mathematical models of the dependencies of the physical, mechanical and dynamic characteristics of fine-grained concrete on the content of additives were obtained

Keywords: fine-grained concrete, shrinkage, damping, expanding admixture, surface tension, shrinkage compensation

Введение

В настоящее время область применения цементных бетонов существенно расширяется. Вместе с тем возрастают требования, предъявляемые к их физико-механическим показателям, что обуславливает необходимость исследований широкого спектра минеральных и химических добавок при разработке состава бетона под конкретную задачу [1–3].

В современном машиностроении прослеживается тенденция к сокращению металлоёмкости промышленного оборудования. Одной из альтернатив чёрным сплавам является бетон на цементном вяжущем [4]. Однако в качестве полноценной замены чугуна традиционный общестроительный бетон подходит не вполне. Практика показывает, что для успешного применения бетона в различных отраслях машиностроения необходима его существенная модификация. Бетон для изготовления базовых деталей станков должен обладать малой усадкой, высокими прочностными, деформативными

и демпфирующими показателями, а также повышенной стойкостью к действию ударной нагрузки и высокоинтенсивной вибрации [5, 6].

Материалы и методы исследования

В эксперименте использовались следующие сырьевые материалы: 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 %; песок кварцевый Ртищевского месторождения (Саратовская обл.) $M_k=2.33$ (ГОСТ 8736-2014); кварцевая мука Silverbond 15 EW R300 $S_{уд}=1100$ м²/кг (Раменский ГОК); гиперпластификатор на поликарбоксилатной основе Sika ViscoCrete 226-P производства Sika Россия (РФ).

Усадочные деформации определялись в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24544-2020 по образцам-призмам 40x40x160 мм. Измерение базового размера осуществлялось непосредственно после распалубки и калибровки реперов, через сутки после формования. Динамические характеристики – логарифмический декремент колебаний образца (δ) и динамический модуль упругости (E_d) – определялись методом свободных изгибных колебаний с использованием образцов-балочек 40x28x300 мм. Прочность образцов – по контрольным образцам-кубам с ребром 50мм. Предельное напряжение сдвига бетонной смеси устанавливали с использованием цилиндра 30x30 мм по методике, изложенной в [7]. Планирование эксперимента, обработка и вывод результатов осуществлялись в программной среде на Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib.

Описание эксперимента и результатов

Для снижения усадочных деформаций в работе использовалась добавка-модификатор поверхностного натяжения – бутилцеллозольв (бутилгликоль, 2-бутоксизтанол). Механизм её действия основан на снижении величины поверхностного натяжения на границе «жидкость – газ» в капиллярных порах цементного камня; таким образом происходит снижение влажностной составляющей усадки бетона [8, 9]. Бутилцеллозольв вводился при приготовлении бетонной смеси с водой затворения. Следующей используемой добавкой являлась Denka CSA20 – расширяющаяся добавка на основе сульфалюмината кальция, которая вводилась в бетонную смесь с замещением части инертного наполнителя. Как показали эксперименты [10], применение указанных добавок позволяет значительно снизить величину усадки бетона. Недостатком расширяющейся добавки является сильная зависимость её эффективности от влажностных условий при твердении, и в случае значительного повышения влажности, при большом содержании этой добавки, может происходить деструкция бетона. Возможностью снизить дозировку расширяющейся добавки может являться дополнительное введение добавки, редуцирующей поверхностное натяжение.

Для исследования влияния совместного введения противоусадочных добавок на физико-механические и динамические свойства мелкозернистого бетона был спланирован двухфакторный эксперимент. Использовался композиционный ротатабельный план с квадратичной моделью. Тип модели – квадратичная регрессия. В качестве факторов задавались: содержание добавки Denka CSA20 в % по массе от Ц (фактор X_1); содержание бутилцеллозольва в % по массе от Ц (фактор X_2). Основные уровни факторов X_1 и X_2 составляли 12 и 1.2 %, а интервалы варьирования – 8 и 0.8 % соответственно. При планировании эксперимента задачей было обеспечить расположение зоны условной «безусадочности» вблизи от центра плана. Для оценки влияния дозировок модификаторов на усадку бетона при заданных температурно-влажностных условиях предварительно автором были проведены соответствующие эксперименты [10].

Сведения о планировании эксперимента сведены в табл. 1.

Применявшийся план эксперимента

Кодовая матрица		Фрагмент плана	Схема кодовой матрицы	Матрица планирования		
X_1	X_2			№ состава	Добавка, % _{масс} от Ц	
		Ядро плана			X_1	X_2
-1	-1			1	4	0.4
1	-1			2	4	2
-1	1			3	20	0.4
1	1			4	20	2
-1.414	0		Опыты в «звёздных» точках	5	12	0.069
1.414	0			6	12	2.33
0	-1.414			7	0.686	1.2
0	1.414			8	23.3	1.2
0	0	Опыт в центре плана	9	12	1.2	

Смешивание компонентов экспериментальных составов (табл. 2) осуществлялось ручным способом в лабораторной чаше затворения с предварительной гомогенизацией сухих компонентов. Формы помещались в камеру с нормальными температурно-влажностными условиями на срок 24 часа. После распалубки образцы выдерживались при нормальных условиях в течение 7 суток, затем помещались в условия с температурой 18...23 °С и относительной влажностью 30...40 %.

Т а б л и ц а 2

Экспериментальные составы мелкозернистого бетона

Компонент, кг/м ³ бетона	№ состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Портландцемент	615	609	615	609	617	608	612	612	612
Кварцевая мука	283	280	185	183	234	231	302	163	233
Песок кварцевый	1230	1218	1231	1218	1233	1215	1224	1225	1224
Бутилцеллозольв	2.46	12.18	2.46	12.18	0.42	14.17	7.34	7.35	7.35
Denka CSA20	24.6	24.4	123.1	121.8	74.0	72.9	4.2	142.8	73.5
Sika 226-p	4.92	4.87	4.92	4.87	4.93	4.86	4.89	4.90	4.90
Вода	215	213	215	213	216	213	214	214	214
Характеристики бетонной смеси									
В/Ц	0.35								
В/Т	0.10								
Плотность, кг/м ³	2375	2361	2377	2362	2379	2359	2368	2370	2369
Диаметр расплыва, мм	101	107	94	98	91	105	106	99	104

На рис. 1-4 представлены визуализации моделей зависимости физико-механических характеристик материала от содержания противоусадочных добавок (в % от массы Ц).

По результатам видно, что битулцеллозольв обладает выраженным пластифицирующим эффектом, в то время как расширяющаяся добавка, наоборот, снижает растекаемость смеси. Наиболее плотная структура бетона соответствует дозировке битулцеллозольва 1...1,5 %. При отсутствии расширяющейся добавки максимум прочности соответствует дозировке Denka CSA20 4...5 % и битулцеллозольва – 1...1,5 % от массы цемента.

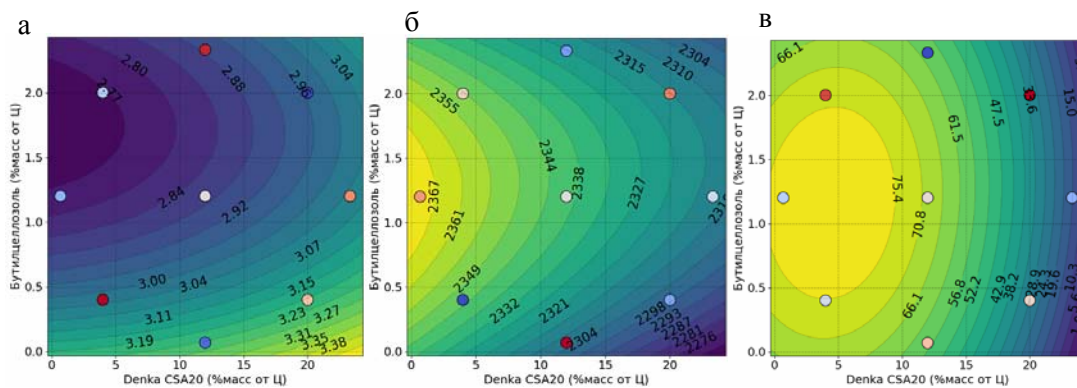


Рис. 1. Визуализация функции отклика для следующих характеристик:
 а – предельное напряжение сдвига смеси, Па; б – плотность бетона (в возрасте 28 сут), кг/м^3 ;
 в – прочность бетона в возрасте 28 сут, МПа

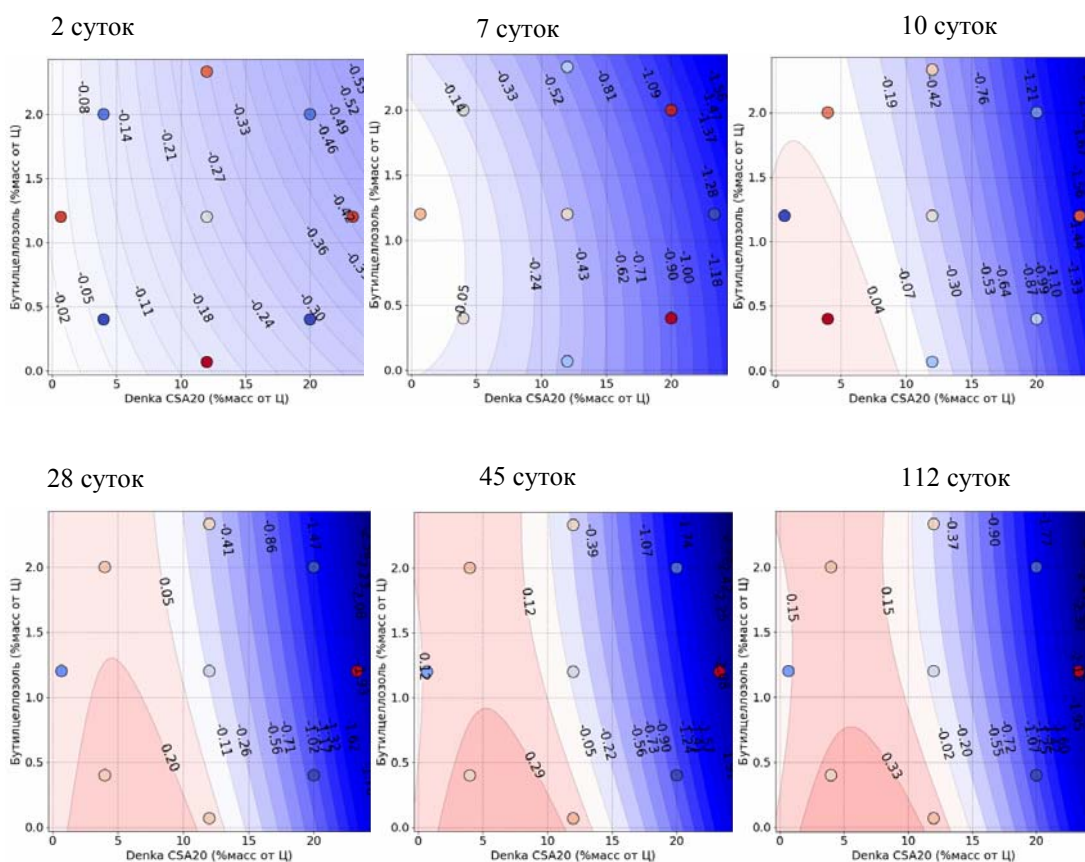


Рис. 2. Поверхность отклика для деформации усадки бетона (в мм/м) на разных сроках твердения

При выдерживании в ранее указанных условиях стабилизация геометрических размеров образцов наблюдается по прошествии 3...4 месяцев. В соответствии с полученной моделью безусловным (в конкретных температурно-влажностных условиях) является бетон, содержащий: 14...15 % расширяющейся добавки при отсутствии модификатора поверхностного натяжения и 7...11 % расширяющейся добавки при введении 1,5 % бутилцеллозоля. При указанных дозировках присутствует усадка, ограниченная в диапазоне от -0,02 до 0,02 мм/м.

Научный и практический интерес представляет исследование влияния противосадочных добавок, в первую очередь расширяющейся, на динамические характеристики бетона (E_d и δ), которые являются структурно-зависимыми свойствами. В этом аспекте введение сульфоалюминатной добавки приводит к повышению фрактальности

и гетерогенности структуры вследствие образования в цементном камне фаз типа этtringита ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) [1].

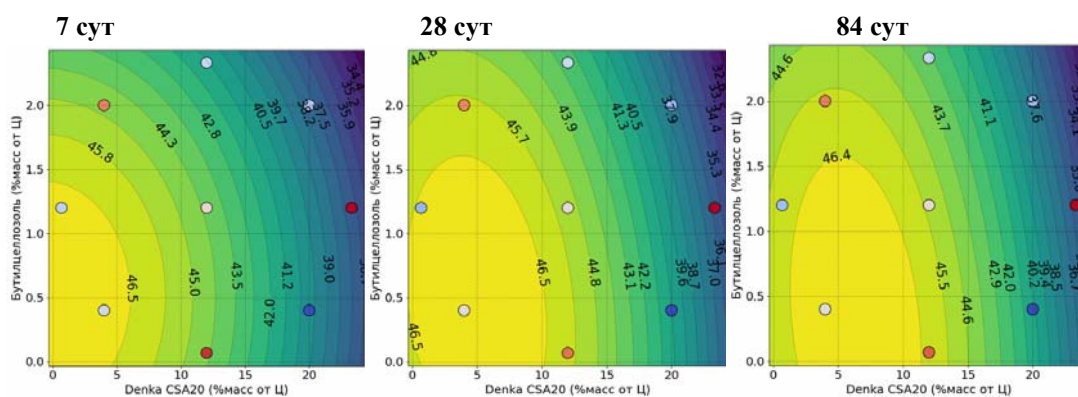


Рис. 3. Визуализация модели изменения динамического модуля упругости бетона, ГПа

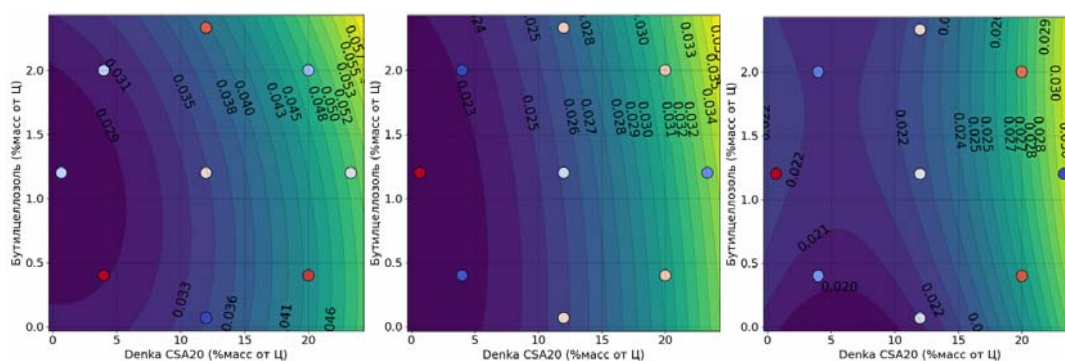


Рис. 4. Визуализация модели изменения логарифмического декремента

Установлено повышение величины динамического модуля упругости при введении расширяющейся добавки в дозировке 4...7 % и бутилцеллозоля в дозировке 0,5...1 %, что хорошо согласуется с результатами определения прочности и может быть объяснено увеличением числа и степени сформированности связей в микроструктуре цементной матрицы.

Основные выводы

Совместное введение расширяющейся добавки Denka CSA20 и бутилцеллозоля позволяет в 1,6 раза сократить расход расширяющейся добавки для получения бетона с нулевой деформацией усадки.

Выявлено заметное влияние противоусадочных добавок на физико-механические (плотность, прочность, предельное напряжение сдвига бетонной смеси) и динамические (логарифмический декремент, динамический модуль упругости) характеристики материала.

Использование противоусадочных добавок актуально при создании бетонных изделий и конструкций повышенной точности, работающих в условиях динамического нагружения.

Список литературы

1. Aïtcin, P.-C. Science and technology of concrete admixtures / P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead publishing, 2015. – 617 p.
2. Калашников, В.И. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов // Строительные материалы. – 2017. – № 1–2. – С. 62–67.
3. Химические и минеральные добавки в бетон / под ред. А.В. Ушерова-Маршака. – Харьков: Колорит, 2005. – 249 p.

4. Лавров, И.Ю. Перспективы применения цементных бетонов для изготовления базовых деталей станков / И.Ю. Лавров // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: сборник материалов XV Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2021. – С. 98–106.
5. Ashby, M.F. *Materials selection in mechanical design* / M.F. Ashby. – 3rd ed. – Oxford (Conn.): Elsevier / Butterworth Heinemann, 2005. – 602 p.
6. Möhring, H.-C. *Materials in machine tool structures* / H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, F. Bleicher // *CIRP Ann.* – 2015. – Vol. 64, № 2. – P. 725–748.
7. Коровкин, М.О. Совершенствование методики определения предельного напряжения сдвига суспензии по ее растекаемости / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, М.Н. Замчалин // *Современные научные исследования и инновации.* – 2015. – № 3–1 (47). – С. 109–112.
8. Eberhardt, A.B. *13 – Working mechanisms of shrinkage-reducing admixtures* / A.B. Eberhardt, R.J. Flatt // *Science and Technology of Concrete Admixtures* / ed. P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead Publishing, 2016. – P. 305–320.
9. Oliveira, M.J. *Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete* / M.J. Oliveira, A.B. Ribeiro, F.G. Branco // *Constr. Build. Mater. Elsevier.* – 2014. – Vol. 52. – P. 267–275.
10. Лавров, И.Ю. Компенсация усадочных деформаций мелкозернистых бетонов для монолитных вибронагруженных конструкций / И.Ю. Лавров, В.А. Береговой // *Цемент и его применение.* – 2024. – № 3. – С. 70–75.

References

1. Aïtcin, P.-C. *Science and technology of concrete admixtures* / P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead publishing, 2015. – 617 p.
2. Kalashnikov, V.I. *On the use of complex additives in new generation concretes* / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov // *Building Materials.* – 2017. – No. 1–2. – P. 62–67.
3. *Chemical and mineral additives in concrete* / edited by A.V. Usharov-Marshak. – Kharkiv: Kolorit, 2005. – 249 p.
4. Lavrov, I.Yu. *Prospects for the use of cement concretes for the manufacture of basic machine parts* / I.Yu. Lavrov // *Theory and practice of improving the efficiency of building materials: collection of materials of the XV International Scientific and Technical Conference.* – Penza, 2021. – P. 98–106.
5. Ashby, M.F. *Materials selection in mechanical design* / M.F. Ashby. – 3rd ed. – Oxford (Conn.): Elsevier / Butterworth Heinemann, 2005. – 602 p.
6. Möhring, H.-C. *Materials in machine tool structures* / H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, F. Bleicher // *CIRP Ann.* – 2015. – Vol. 64, № 2. – P. 725–748.
7. Korovkin, M.O. *Improvement of the methodology for determining the limiting shear stress of a suspension by its spreading capacity* / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, M.N. Zamchalin // *Modern scientific research and innovations.* – 2015. – № 3–1 (47). – P. 109–112.
8. Eberhardt, A.B. *13 – Working mechanisms of shrinkage-reducing admixtures* / A.B. Eberhardt, R.J. Flatt // *Science and Technology of Concrete Admixtures* / ed. P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead Publishing, 2016. – P. 305–320.
9. Oliveira, M.J. *Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete* / M.J. Oliveira, A.B. Ribeiro, F.G. Branco // *Constr. Build. Mater. Elsevier.* – 2014. – Vol. 52. – P. 267–275.
10. Lavrov, I.Yu. *Compensation of shrinkage deformations of fine-grained concrete for monolithic vibration-loaded structures* / I.Yu. Lavrov, V.A. Beregovoy // *Cement and its application.* – 2024. – № 3. – P. 70–75.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Мартышкин Даниил Олегович,
аспирант

E-mail: historical95@mail.ru

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Строительные конструкции»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Залилов Илья Владимович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: zalilov.ilya@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

Martyshkin Daniil Olegovich,
Postgraduate student

E-mail: historical95@mail.ru

Ariskin Maxim Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the
department «Building Structures»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Zalilov Ilya Vadimovich,
Postgraduate of the department «Building
Structures»

E-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ БОЛТЫ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

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

Для обеспечения коррозионной стойкости и прочности соединений деревянных конструкций в объектах с агрессивной средой необходимо применять композитные механические связи. Предложены стеклопластиковые болты в соединениях деревянных конструкций. Описана методика определения несущей способности стеклопластиковых болтов. Представлены результаты испытаний образцов. Установлены величины несущей способности и критерий разрушения стеклопластиковых болтов.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, стеклопластиковый болт, несущая способность, критерий разрушения

FIBERGLASS BOLTS FOR JOINTS OF WOODEN STRUCTURES

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

To ensure corrosion resistance and strength of joints of wooden structures in objects with an aggressive environment, it is necessary to use composite mechanical bonds. Fiberglass bolts in the joints of wooden structures are proposed. Method for determining the bearing capacity is presented. The test results are presented. The values of the bearing capacity and the criterion of destruction are established.

Keywords: wooden structures, connection, fiberglass bolt, bearing capacity, criterion of destruction

Наиболее эффективно древесина используется при возведении большепролетных зданий и сооружений, а также при строительстве многоэтажных домов [1-3]. Древесина в отличие от металлических и железобетонных конструкций обладает большей стойкостью к воздействию агрессивных сред [1]. В связи с чем деревянные несущие конструкции нашли применение при эксплуатации объектов с высокой влажностью (бассейны, хоккейные стадионы, объекты сельского хозяйства и химической промышленности) [1-2].

Для обеспечения коррозионной стойкости и прочности соединений деревянных конструкций в объектах с агрессивной средой необходимо использовать композитные механические связи: вклеенные шайбы из стеклопластиков и стеклотекстолитов [4, 5], а также пластиков [6], нагели [7-9] и болтовые комплекты. Предложены болтовые соединения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) [10]. Следует

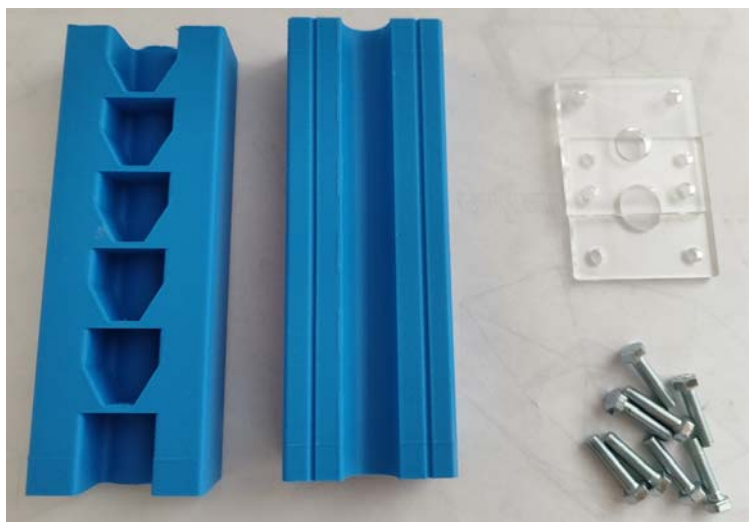
отметить, что для обеспечения коррозионной стойкости соединений применяются болтовые комплекты из легированных металлов.

В ходе исследований необходимо было установить на основе натуральных испытаний возможность применения стеклопластиковых болтов в соединениях деревянных конструкций.

Диаметр болта D_b принят равным 16 мм на основании ранее проведенных испытаний образцов с клееными стеклопластиковыми шайбами [4, 5]. В качестве материалов для стеклопластикового болта приняты смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) и стеклопластиковая арматура (ГОСТ 31938-2012). Болты изготавливались в лаборатории кафедры «Строительные конструкции» ПГУАС, для чего была выполнена пластиковая опалубка, напечатанная на 3D-принтере (рис. 1). Диаметр внутреннего паза – 16 мм, что соответствует диаметру болта D_b .

Элементы опалубки (рис. 1, а) стягиваются в единую конструкцию болтами. После чего в центр опалубки устанавливается стержень стеклопластиковой арматуры диаметром (D_a) 12 мм с предварительно выполненной шероховатой поверхностью (рис. 1, б). Далее в опалубку заливается эпоксидная смола ЭД-20. Опалубка фиксируется струбцинами для жесткости и выдерживается в течение 2-3 дней для полного отверждения.

а



б

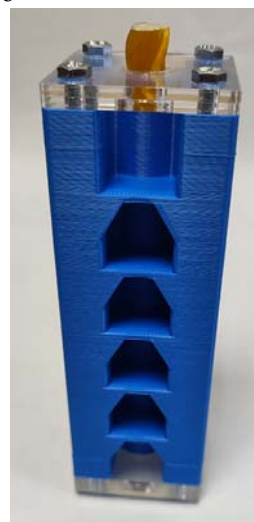


Рис. 1. Опалубка для изготовления стеклопластикового болта:

а – элементы опалубки; б – собранная опалубка со стержнем из стеклопластиковой арматуры

После отверждения стержни извлекаются из опалубки. Выступы арматуры срезаются. Стеклопластиковые стержни осматриваются и маркируются (рис. 2), после чего производятся испытания.



Рис. 2. Общий вид стеклопластиковых стержней

Образцы испытывались на срез по схеме, согласно которой нагружение производилось через металлические накладки, передающие усилия на стеклопластиковый стержень (рис. 3, а).

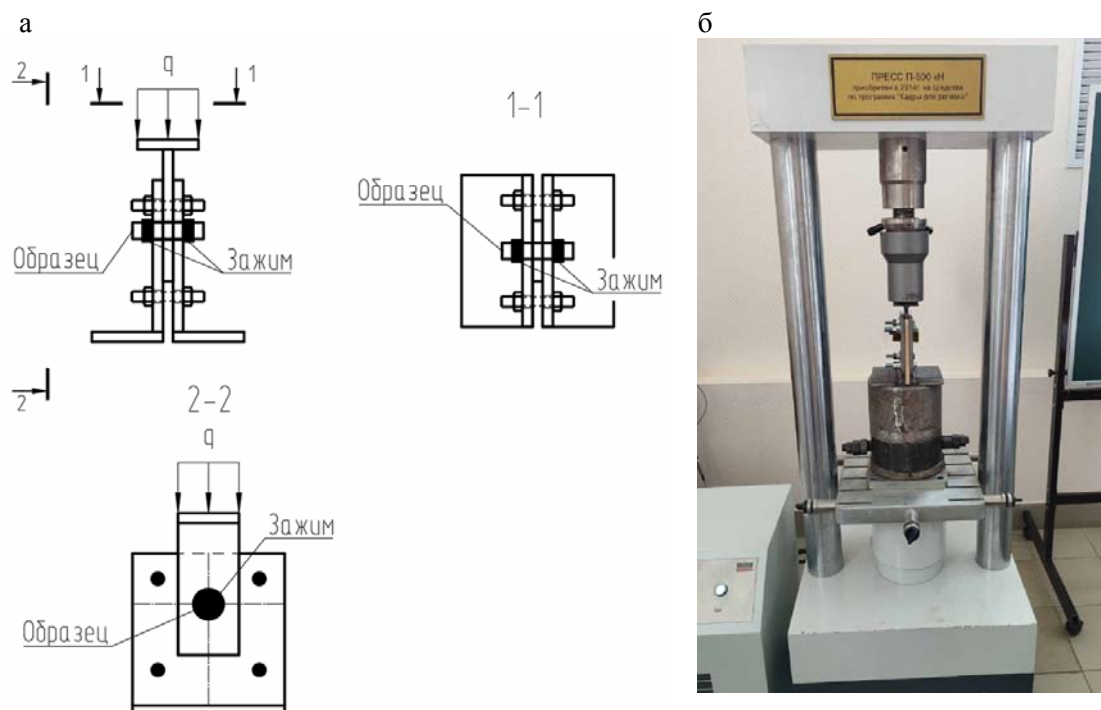


Рис. 3. Испытание образцов:

- а – схема нагружения образца через металлические накладки;
б – образец в гидравлическом прессе П-500

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 (рис. 3, б). На основе ранее испытанных образцов с клееными стеклопластиковыми шайбами передача нагрузки на образцы осуществлялась непрерывно со скоростью нагружения 2 кН/мин, 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. За разрушающую нагрузку (несущую способность) принимают такую величину, при которой деформации сдвига не превышают 2,0 мм по аналогии с испытаниями соединений на клеенных стеклопластиковых шайбах [5]. Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки приведены в таблице, графики нарастания деформаций сдвига представлены на рис. 4.

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки

Марка образца	Диаметр болта D , мм	Скорость нагружения, кН/мин	Разрушающая нагрузка $P_{\text{разр}}$, кН
Б-1.1	16	2	21,21
Б-1.2			21,69
Б-1.3			26,74
Б-2.1		3	17,58
Б-2.2			19,79
Б-3.1		3	20,53
Б-3.2			19,00

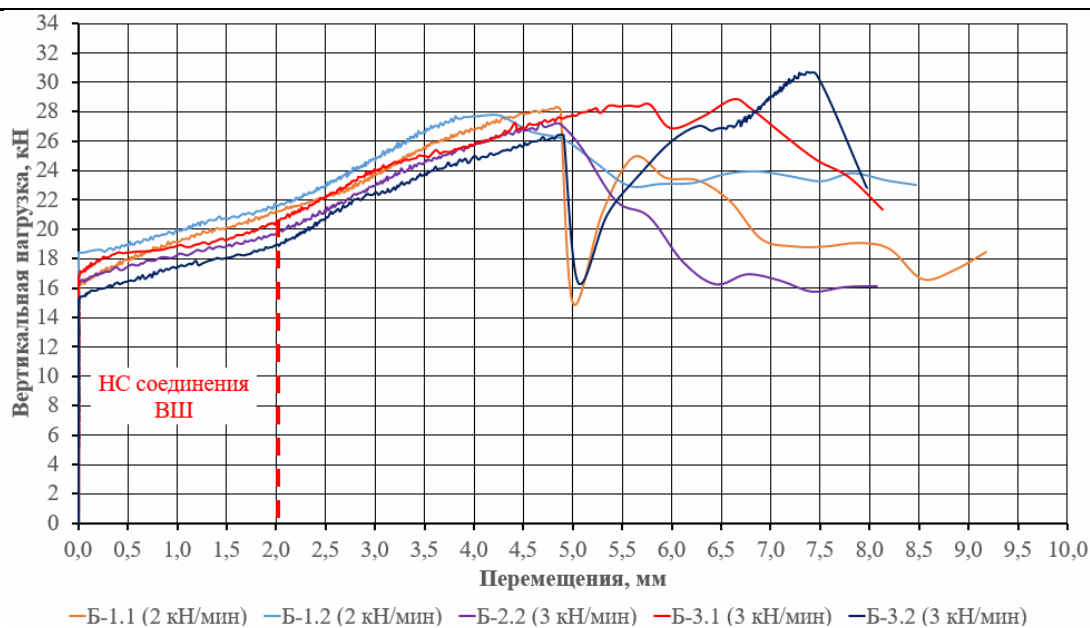


Рис. 4. Деформации сдвига стеклопластиковых стержней

В таблице представлена разрушающая нагрузка $P_{\text{разр}}$ образцов при различной скорости нагружения. Величины $P_{\text{разр}}$ образцов Б-1.3 и Б-2.1 значительно отличаются от других образцов при тех параметрах скорости нагружения. На этом основании не учитываем результаты разрушающей нагрузки образцов Б-1.3 и Б-2.1 (рис. 4).

Согласно рис. 4 и данным таблицы установлено, что скорость нагружения образцов незначительно влияет на величину разрушающей нагрузки (невязка не превышает 7 %).

Согласно рис. 4, упругая работа образцов наблюдается при нагрузке, не превышающей 18 кН (величина деформаций недостаточна для фиксации силоизмерителем прессы), после начинают возникать деформации сдвига. Далее происходит смятие шайбы под центровым болтом до включения в работу композитной арматуры. Нагружение образцов продолжалось до полного разрушения. Общий вид разрушения образцов показан на рис. 5. Общее разрушение образца сопровождалось интенсивным ростом деформаций сдвига без заметного увеличения нагрузки на сравнительно большом промежутке времени.



Рис. 5. Общий вид разрушения стеклопластиковых болтов

Средняя разрушающая нагрузка по трем сериям испытаний составила 20,44 кН. (Как отмечено, скорость нагружения незначительно влияет на разрушающую нагрузку.) Средняя величина напряжений в арматурном стержне (при поперечном срезе) составляет 180,82 МПа, что превышает величину предела прочности при поперечном срезе для стеклокомпозитной арматуры (150 МПа) по ГОСТ 31938-2012.

Согласно рис. 5, разрушение стеклопластикового стержня сопровождается смятием и растрескиванием наружного слоя смолы и разрушением внутреннего слоя стеклопластиковой арматуры в месте приложения нагрузки, что соответствует схеме испытания. В качестве критерия разрушения принято полное разрушение стержня.

Таким образом, на основе натуральных испытаний установлена удовлетворительная несущая способность стеклопластиковых стержней, что позволяет использовать их как болты или шпильки (с нанесением резьбы и изготовлением стеклопластиковых гаек и шайб) в соединениях несущих деревянных конструкций.

Выводы

На основании натуральных испытаний стеклопластиковых стержней на срез установлена удовлетворительная несущая способность, которая составила 20,44 кН, что подтверждает практическую применимость в деревянных конструкциях, а именно в соединениях с использованием клеенных шайб из композитных материалов для обеспечения коррозионной стойкости и немагнитности узла.

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. – М.: АСВ, 2004. – 440 с.
2. Калугин, А.В. Деревянные конструкции / А.В. Калугин. – М.: АСВ, 2008. – 286 с.
3. 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.
4. Вдовин, В.М. Коррозионно-стойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций / В.М. Вдовин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4(41). – С. 103–108.
5. Арискин, М.В. Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2(51). – С. 96–103.
6. Арискин, М.В. Аддитивные технологии в изготовлении шайб соединений деревянных конструкций / М.В. Арискин, И.В. Залилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 144–151.
7. 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.
8. 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.
9. 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. – М., 2018. – С. 247–253.

10. Кузнецов, И.Л. Болтовое соединение в стержневых конструкциях из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) / И.Л. Кузнецов, Д.Н. Арипов, А.Э. Фахрутдинов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – №4(46). – С. 200–207.

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. – M.: ASV Publishing House, 2004. – P 440.
2. Kalugin, A.V. Wooden constructions / A.V. Kalugin. – M.: ASV Publishing House, 2008. – P. 286.
3. 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.
4. Vdovin, V.M. Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures / V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No4(41). – P. 103–108.
5. Ariskin, M.V. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No2(51). – P. 96–103.
6. Ariskin, M.V. Additive technologies for making washers of wooden structure connections / M.V. Ariskin, I.V. Zalilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – No 3 (56). – P. 144–151.
7. 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.
8. 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.
9. 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. – M., 2018. – P. 247–253.
10. Kuznetsov, I.L. Bolted connection in core structures made of pultrusion fiberglass profiles (PSP) / I.L. Kuznetsov, D.N. Aripov, A.E. Fakhрутdinov // Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2018. – №4(46). – P. 200–207.

УДК 691:004

*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
E-mail: knmakhambetova@gmail.com

Лавров Иван Юрьевич,
аспирант

Сидорин Сергей Павлович,
магистрант
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 Kamazhay Nurabullayevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: knmakhambetova@gmail.com

Lavrov Ivan Yurievich,
Postgraduate student

Sidorin Sergey Pavlovich,
Master's student
E-mail: techbeton@pguas.ru

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ DIC И CV В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

К.Н. Махамбетова, И.Ю. Лавров, С.П. Сидорин

Рассмотрена возможность применения метода корреляции цифровых изображений с целью выявления и анализа параметров дефектов, возникающих в процессе механического нагружения образцов, а также для измерения деформаций и определения характера разрушения материала. Компьютерная обработка данных, дополненная результатами определения параметров нагружающего усилия, лежит в основе комплексного подхода к анализу механических характеристик строительного материала. Предусматривается автоматизация выполняемых операций посредством программного кода, разработанного с использованием открытых библиотек.

Ключевые слова: корреляция цифровых изображений, деформация, опасные трещины, бетон

TECHNICAL ASPECTS OF APPLICATION OF TECHNOLOGIES DIC AND CV IN CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

K.N. Makhambetova, I. Yu. Lavrov, S. P. Sidorin

The possibility of using the digital image correlation method to identify and analyze the parameters of defects that occur during mechanical loading of samples, as well as to measure deformations and determine the nature of material destruction is considered. Computer data processing, supplemented by the results of the loading force parameters, underlies an integrated approach to analyzing the mechanical characteristics of the building material. Automation of the operations performed is envisaged by means of a program code developed using open libraries.

Keywords: digital image correlation, deformation, dangerous cracks, concrete

Повышение эффективности функционирования строительного комплекса тесно связано с применением инновационных цифровых технологий. Они основаны на методах кодировки и передачи информации, позволяющих в автоматическом режиме решать множество взаимосвязанных задач за кратчайшие промежутки времени, используя математические модели материалов, конструкций и физико-механических процессов с высоким уровнем достоверности. При этом каждой компьютеризированной технологии соответствует свой инструментарий, обеспечивающий достижение результата заданной информативности.

Современные цифровые технологии, такие, как Digital Image Correlation (DIC) и Computer Vision (CV), в настоящее время находят всё более широкое применение в различных отраслях науки и техники. С их помощью можно всесторонне исследовать

динамику процессов разрушения материалов и конструкций и получить расширенный спектр экспериментальных данных по сравнению с традиционными подходами.

Технология DIC создана в начале 1980-х гг. группой ученых из университета Южной Каролины (США) [1-5]. Базовый алгоритм корреляции цифровых изображений, использующий технику быстрого преобразования Фурье, был успешно апробирован в 1983 году. Бурное распространение высокопроизводительных вычислительных систем и развитие библиотек сложных алгоритмов способствовало популяризации DIC в инженерной среде 1990-х годов [6].

Методы оптического измерения макроскопических параметров, таких, как деформация и перемещение, начали разрабатываться ещё в XX веке; за это время они прошли путь от стадии фундаментальных исследований до разработанных и апробированных методов, применяемых для анализа множества инженерных проблем [7]. Национальная физическая лаборатория (Великобритания) совершенствует их для использования DIC при определении характеристик и мониторинга инженерных систем в атомной промышленности [8]. Существенный вклад в развитие метода корреляции цифровых изображений внесли М.А. Sutton [9], F. Hild, S. Roux [10], B. Pan [11] и др.

В настоящее время интенсивно развивается технология «компьютерное зрение» [Computer Vision (CV)], позволяющая анализировать оптические данные (фотоснимки и видеозаписи) в режиме реального времени. Это расширяет возможности автоматического анализа оптических данных как важного элемента современных информационных систем.

Применительно к строительному материаловедению мощный инструментальный метод корреляции цифровых изображений, дополненного технологией компьютерного зрения, может быть применён с целью определения поля деформаций боковых поверхностей испытуемого образца, автоматического считывания показаний силоизмерителя нагружающего устройства и в итоге – определения характера разрушения материала. Момент появления видимых трещин на поверхности бетонного образца является оптическим признаком приближения работы конструкций к предельному режиму нагружения. При этом часто возникает необходимость выявить характер и причины их появления. Цифровая корреляция изображений, получаемых в режиме реального времени, позволяет реализовать бесконтактный экспресс-метод измерения и оценки деформации на контролируемой поверхности, отслеживания кинетику процесса и степень смещения деформируемого материала. В условиях реальной эксплуатации такая технология обеспечивает возможность исследовать поведение бетона на всех этапах: от момента появления трещин до их распространения с дальнейшим развитием критических деформаций материала. Компьютерная обработка полученных данных, совмещенная с результатами нагружающего усилия, позволит реализовать комплексный анализ механических характеристик материала.

Гидравлическое прессовое оборудование и датчики перемещения часового типа широко применяют для проведения механических испытаний по определению прочности, модуля упругости, коэффициента Пуассона, характеристик трещиностойкости. В большинстве своем гидравлические прессы не имеют другой системы вывода информации, кроме циферблатного табло (рис. 1).



Рис. 1. Вид лабораторных гидравлических прессов

Для определения предела прочности при сжатии достаточно значений разрушающего усилия и геометрических параметров сечения образца, которые получают путем проведения прямых испытаний. Однако оценка деформативных характеристик требует дополнительного определения деформаций образца в ходе нагружения, что увеличивает продолжительность испытания и вносит субъективный фактор. Предварительно был проведен анализ преимуществ и недостатков существующих способов определения деформаций (см. таблицу).

Оценка способов определения деформаций материалов при механических испытаниях

С применением механических датчиков		С применением тензорезисторов		С применением Digital Image Correlation	
Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки
Высокая доступность	Зачастую отсутствует цифровой интерфейс для вывода данных	Низкая стоимость	Необходимость в дополнительном оборудовании (тензостанция, температурные компенсаторы)	Высокая экспрессность и возможность применения в полевых условиях	Необходимость в фото/видео-регистрирующей аппаратуре
Высокая надежность	Высокая стоимость	Высокая чувствительность	Особые требования к поверхности образца и месту наклеивания датчика	Возможность определения поля деформации	
	Необходимость в дополнительных конструкциях при монтаже или закладных деталях в образце			Возможность автоматизации анализа деформации с помощью программного кода	
Высокая точность	Высокая чувствительность к точности установки и юстировки				Упрощенное выявление ошибок, возникающих при испытании (неточное выравнивание образца)

Дополнительным преимуществом технологии DIC является возможность непосредственной регистрации процесса возникновения трещин в материале. Поэтому система обнаружения трещин на основе изображений может заменить трудоемкую традиционную проверку. Целью исследования является создание автоматической системы сбора и анализа оптических данных, регистрируемых при механических испытаниях строительных материалов. Суть метода DIC, реализованного в нашем исследовании, заключается в анализе поведения образца под нагрузкой и визуализации деформации по всей видимой поверхности образца. Камера регистрирует серию изображений во время испытания, сравнивает изображение за изображением и рассчитывает смещение в предварительно установленном поле. При этом каждое сравнение

содержит определенное количество пикселей камеры. Отслеживая блоки пикселей, система измеряет смещения на поверхности и создает полные векторные поля деформаций. Чтобы метод работал эффективно, блоки пикселей должны быть случайными и уникальными с диапазоном уровней контрастности и интенсивности. Метод основан на определении коэффициента взаимной корреляции массива пикселей, который вычисляется по уравнению

$$r_{ij}(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}) = 1, \quad (1)$$

где $F(x_i, y_j)$ – интенсивность пикселя в точке (x_i, y_j) по серой шкале на недеформированном изображении; $G(x_i^*, y_j^*)$ – интенсивность пикселя в точке (x_i^*, y_j^*) по серой шкале на деформированном изображении; \bar{F} и \bar{G} – средние значения матриц интенсивности F и G соответственно.

Координаты, или точки сетки, (x_i, y_j) и (x_i^*, y_j^*) связаны с деформацией, которая произошла между двумя изображениями. Если движение перпендикулярно оптической оси камеры, то соотношение между (x_i, y_j) и (x_i^*, y_j^*) может быть аппроксимировано с помощью двумерных аффинных преобразований:

$$x^* = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y; \quad (2)$$

$$y^* = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y, \quad (3)$$

где u и v – поступательное движение центра прообраза по осям X и Y соответственно. Расстояние от центра прообраза до точки (x, y) обозначено Δx и Δy . Таким образом, коэффициент корреляции r_{ij} – это функция от компонента перемещений (u, v) и градиента перемещений.

Результатом работы является возможность автоматической оцифровки показаний циферблатного, электромеханического или электронного табло датчиков испытательного оборудования с помощью инструментов машинного зрения, определения поля деформаций и перемещений испытуемого образца с возможностью распознавания и анализа параметров раскрытия трещин. На основе проанализированных данных создаются цветные карты деформации, позволяющие легко проанализировать поведение образца. Поведение образца отображается в цвете, предоставляя информацию о неоднородных локальных деформациях и других особенностях. Эти локальные деформации можно анализировать с помощью различных инструментов, например виртуальных расчетных длин. Примеры практического применения инструментария DIC при механических испытаниях материалов и изделий показаны на рис. 2.

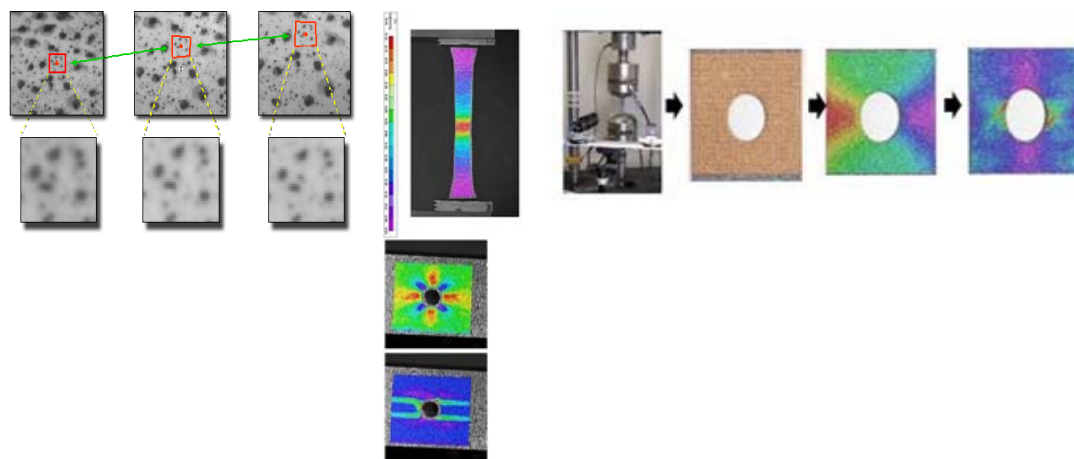


Рис. 2. Примеры практического применения инструментария DIC при механических испытаниях материалов и изделий

Все измеренные значения, результаты испытаний и изображения сохраняются, регулируются и анализируются вместе. Далее осуществляется синхронизация полученных данных для автоматического построения диаграмм нагружения (при анализе прочности), определения J -интеграла и коэффициента интенсивности напряжений (при испытаниях на трещиностойкость). Примерная схема применения технологий DIC и CV при испытании строительных материалов приведена на рис. 3.



Рис. 3. Примерная схема проведения испытаний при исследовании прочностных и деформативных характеристик материалов

Здесь задействованные инструменты CV служат для распознавания показаний силоизмерителя пресса путем определения угла поворота стрелки (рис. 4).

```
python
from PIL import Image
import matplotlib.pyplot as plt
import cv2
import numpy as np

# Load the uploaded image
image_path = '/mnt/data/2024-10-26_01-39-38.png'
image = Image.open(image_path)

# Convert to grayscale and display the image for initial analysis
gray_image = np.array(image.convert('L'))

# Display the image to understand the layout of the dial
plt.imshow(gray_image, cmap='gray')
plt.axis('off')
plt.show()
```

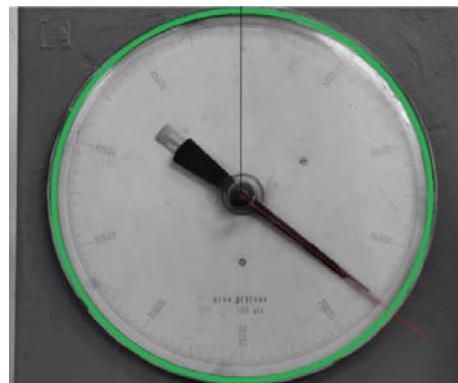


Рис. 4. Инструменты CV для распознавания показаний силоизмерителя пресса

При проведении испытаний цифровая корреляция изображения осуществляется на ровной измеряемой поверхности, во время работы не будет значительного проворачивания и заваливания поверхности, а также существенного бокового перемещения образца. Кроме того, важно, что для корректной работы измерительной системы DIC требуется высокая контрастность исследуемой поверхности образца. Распыление красящего вещества позволяет легко и быстро наносить на образец контрастный шаблон. Программное обеспечение устанавливает на имеющийся шаблон виртуальные измерительные метки. Проведенные нами предварительные опыты показали, что при испытании хрупких материалов размер цветных пятен должен быть крайне малым, что невозможно обеспечить аэрозольным баллончиком, вследствие чего был

использован аэрограф. Размер точек в получаемых рисунках находился в пределах 0,05–0,1 мм.

Следует отметить, что на современном рынке представлено большое количество систем, реализующих технологию DIC, однако они являются крайне дорогостоящими вследствие технической реализации трехмерной измерительной системы, что, в свою очередь, является избыточным для цели испытания контрольных образцов строительных материалов. Кроме того, поставляемый в их составе программный код является закрытым, что существенно усложняет необходимую реконфигурацию под задачи строительного материаловедения. Поэтому следующим этапом работы являлась разработка и оптимизация программного кода. Для этого предварительно был проведен обзор существующих библиотек и модулей для реализации систем DIC и CV. Для DIC принято решение использовать библиотеку muDIC, а для компьютерного зрения – OpenCV. На основе подобранных модулей был создан программный код на языке Python, реализующий обработку изображений образца при испытании, вычисляющий деформации и визуализирующий их распределения по поверхности образца в соответствии со следующим алгоритмом:

- 1) нанесение на поверхность образца контрастирующего рисунка;
- 2) установка образца в испытательную машину, настройка и фокусировка камеры по нему;
- 3) настройка и фокусировка камеры, отвечающей за считывание показаний нагрузки посредством компьютерного зрения;
- 4) запуск испытания с записью оптической информации;
- 5) передача полученной информации на компьютер, обработка и синхронизация данных с помощью программного кода;
- 6) вывод результатов эксперимента в наглядном виде (диаграмма нагружения, характер разрушения, поле деформации).

Таким образом, применение технологий DIC и CV в бетоноведении имеет практическую значимость. Они просты в использовании и экономически эффективны по сравнению с другими методами, такими, как спекл-интерферометрия, а также более точны и универсальны, чем методы ручных измерений, что позволяет найти им множество потенциальных применений. Данные технологии являются перспективными и могут быть использованы как в научно-исследовательской деятельности, так и в учебном процессе для привлечения обучающихся к современным цифровым технологиям.

Список литературы

1. Peters, W. Digital imaging techniques in experimental stress analysis / W. Peters, W. Ranson // *Optical engineering*. – 1982. – 21(3). – 213427. – DOI: <https://doi.org/10.1117/12.7972925>.
2. Peters, W. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics / W. Peters, W. Ranson, M. Sutton, T. Chu, J. Anderson // *Optical engineering*. – 1983. – 22(6). – 226738. – doi:<https://doi.org/10.1117/12.7973231>.
3. Chu, T. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics / T. Chu, W. Ranson, M.A. Sutton // *Experimental Mechanics*. – 1985. – №25(3). – P.232–244.
4. Sutton, M. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis / M. Sutton, C. Mingqi, W. Peters, Y. Chao, S. McNeill // *Image and Vision Computing*. – 1986. – №4(3). – P. 143–150. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(86\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0262-8856(86)90057-0).
5. Sutton, M.A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications: Springer Science & Business Media / M.A. Sutton, J.J. Orteu, H. Schreier. – 2009.

6. Blaber, J. Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software / J. Blaber, B. Adair, A. Antoniou // *Experimental Mechanics*. – 2015. – №55(6). – P. 1105–1122. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>.
7. Chu, T.C. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics / T.C. Chu, W.F. Ranson, M.A. Sutton // *Experimental mechanics*. Kluwer Academic Publishers. – 1985. – Vol. 25. – P. 232–244.
8. McCormick, N. Digital image correlation / N. McCormick, J. Lord // *Materials today*. Elsevier. – 2010. – Vol. 13, № 12. – P. 52–54.
9. Sutton, M.A. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis / M.A. Sutton, Cheng Minghi, W.H. Peters, Y.J. Chao, S.R. McNeill // *Image and Vision Computing*. – 1986. – Vol.4, №3. – P.143–150.
10. Hild, F. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties – a review / F. Hild, S. Roux // *Strain*. – 2006. – Vol.42, №2. – P.69–80.
11. Pan, B. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review / B. Pan // *Measurement Science and Technology*. – 2009. – Vol.20, №6. – P.062001.

References

12. Peters, W. Digital imaging techniques in experimental stress analysis / W. Peters, W. Ranson // *Optical engineering*. – 1982. – 21(3). – 213427. – DOI: <https://doi.org/10.1117/12.7972925>.
13. Peters, W. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics / W. Peters, W. Ranson, M. Sutton, T. Chu, J. Anderson // *Optical engineering*. – 1983. – 22(6). – 226738. – doi:<https://doi.org/10.1117/12.7973231>.
14. Chu, T. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics / T. Chu, W. Ranson, M.A. Sutton // *Experimental Mechanics*. – 1985. – №25(3). – P.232–244.
15. Sutton, M. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis / M. Sutton, C. Mingqi, W. Peters, Y. Chao, S. McNeill // *Image and Vision Computing*. – 1986. – №4(3). – P. 143–150. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(86\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0262-8856(86)90057-0).
16. Sutton, M.A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications: Springer Science & Business Media / M.A. Sutton, J.J. Orteu, H. Schreier. – 2009.
17. Blaber, J. Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software / J. Blaber, B. Adair, A. Antoniou // *Experimental Mechanics*. – 2015. – №55(6). – P. 1105–1122. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>.
18. Chu, T.C. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics / T.C. Chu, W.F. Ranson, M.A. Sutton // *Experimental mechanics*. Kluwer Academic Publishers. – 1985. – Vol. 25. – P. 232–244.
19. McCormick, N. Digital image correlation / N. McCormick, J. Lord // *Materials today*. Elsevier. – 2010. – Vol. 13, № 12. – P. 52–54.
20. Sutton, M.A. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis / M.A. Sutton, Cheng Minghi, W.H. Peters, Y.J. Chao, S.R. McNeill // *Image and Vision Computing*. – 1986. – Vol.4, №3. – P.143–150.
21. Hild, F. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties – a review / F. Hild, S. Roux // *Strain*. – 2006. – Vol.42, №2. – P.69–80.
22. Pan, B. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review / B. Pan // *Measurement Science and Technology*. – 2009. – Vol.20, №6. – P.062001.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Россия, 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Мирсаяпов Илшат Талгатович,
доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Железобетонные и каменные
конструкции»

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5

Селиванов Антон Валерьевич,
старший преподаватель кафедры «Мосты
и тоннели»

Регер Федор Федорович,
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
кафедры «Промышленное и гражданское
строительство»

*Омский государственный технический
университет*

Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11

Вансович Константин Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Нефтегазовое дело, стандартизация
и метрология»

*Kazan State University of Architecture and
Engineering*

Russia, 420043, Kazan, 1, Zelyonaya St.

Mirsayapov Ilshat Talgatovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Reinforced Concrete
and Stone Structures»

*Siberian State Automobile and Highway
University*

Russia, 644080, Omsk, 5, Mira Ave.

Selivanov Anton Valerievich,
Senior Lecturer of the Department «Bridges and
Tunnels»

Reger Fedor Fedorovich,
Candidate of Agricultural Sciences, Associate
Professor of the Department «Industrial and Civil
Engineering»

Omsk State Technical University

Russia, 644050, Omsk, Mira Ave., 11

Vansovich Konstantin Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Oil and Gas Engineering,
Standardization and Metrology»

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ-ОБОЛОЧКИ ПЕРЕКРЫТИЯ

И.Т. Мирсаяпов, А.В. Селиванов, Ф.Ф. Регер, К.А. Вансович

Объект исследования – железобетонная плита-оболочка перекрытия с овальными пустотами в полке, с изогнутой нижней и горизонтальной верхней поверхностями полки и четырьмя опорами. Цель данной работы – сравнение результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования и экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции. Нагрузка считается равномерно распределенной по площади верхней поверхности полки. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции в натуральную величину проводится с использованием программных комплексов ЛИРА и Ansys. Экспериментальное исследование выполняется на железобетонных моделях с дальнейшим пересчетом результатов на натурные конструкции. Результатами исследований являются: диаграммы деформирования, мозаики напряжений и изополя прогибов, полученные авторами для исследуемой конструкции с помощью компьютерного моделирования ее напряженно-деформированного состояния; анализ напряженно-деформированного состояния плиты-оболочки по результатам компьютерного моделирования; объяснение механизма разрушения исследуемой конструкции на основе анализа ее напряженно-деформированного состояния; сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования, выполненных авторами, с результатами исследований других авторов.

Ключевые слова: железобетонная плита-оболочка, перекрытие, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, экспериментальное исследование

COMPUTER SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE PLATE-SHELL OF FLOOR

I.T. Mirsayapov, A.V. Selivanov, F.F. Reger, K.A. Vansovich

The object of study is a reinforced concrete floor shell slab with oval voids in the flange, with a curved lower and horizontal upper surface of the flange and four supports. The purpose of this work is to compare the results obtained as a result of computer modeling and experimental research of the stress-strain state of the structure under study. The load is considered to be uniformly distributed over the area of the upper surface of the shelf. Computer modeling of the stress-strain state of the structure under study in full size is carried out using the Lira and Ansys software packages. The experimental study is carried out on reinforced concrete models with further conversion of the results to full-scale structures. The results of the research are: strain diagrams, stress mosaics and deflection isofields obtained by the authors for the structure under study as a result of computer modeling of its stress-strain state; analysis of the stress-strain state of the shell slab based on the results of computer modeling; explanation of the mechanism of destruction of the structure under study based on the results of the analysis of its stress-strain state; comparison of the results of computer modeling and experimental research performed by the authors with the results of research by other authors.

Keywords: Reinforced concrete slab-shell; Floor; Computer modeling; Stress-strain state; Experimental study

Введение. Сборные железобетонные ребристые плиты длительное время использовались в перекрытиях и покрытиях различных зданий. В девяностые годы XX века в связи с сокращением объемов промышленного строительства эти конструкции на многих заводах были сняты с производства.

В настоящее время в связи с возрождением и модернизацией промышленных предприятий в Российской Федерации потребность в ребристых плитах возникла вновь.

При возобновлении их производства возникает ряд вопросов, связанных прежде всего с технологией изготовления. При изготовлении пустотных плит перекрытий заводы от агрегатно-поточной технологии, широко используемой для производства ребристых плит [1], постепенно отказываются в пользу безопалубочной [2], которая при всех ее достоинствах имеет ряд ограничений (невозможность установки поперечной арматуры, постоянный по всей длине профиль), не позволяющих изготавливать ребристые плиты.

Заменой ребристой плите может являться плита-оболочка [3] или вспарушенная плита [4] с цилиндрической в поперечном направлении нижней поверхностью и плоской верхней, находящаяся при равномерной нагрузке в напряженном состоянии, близком к безмоментному, оптимальная по несущей способности и по расходу материалов, что позволяет армировать ее только продольной рабочей арматурой и изготавливать методом безопалубочного формования.

Авторами предлагается железобетонная плита перекрытия [5] (рис. 1), содержащая верхнюю и нижнюю полки, продольные контурные и промежуточные ребра, а также продольные пустоты, размещенные между ребрами, отличающаяся тем, что она армирована только продольными предварительно напряженными элементами, размещенными в каждом из продольных ребер, а также в месте сопряжения верхней и нижней полок. Нижняя полка выполнена вогнутой в сторону верхней полки. При этом сечения продольных пустот уменьшаются от боковых ребер к центру плиты. Сечения продольных пустот, расположенных рядом с продольными контурными ребрами, имеют эллипсоидальную форму. Сечения других продольных пустот – форму дуг окружностей. Сечения всех продольных пустот выполнены в геометрии, не допускающей обрушения бетона при формовании.

На данный момент для рассматриваемого сечения не предложены схемы распределения нормальных напряжений и прогибов при действии равномерно распределенной нагрузки.

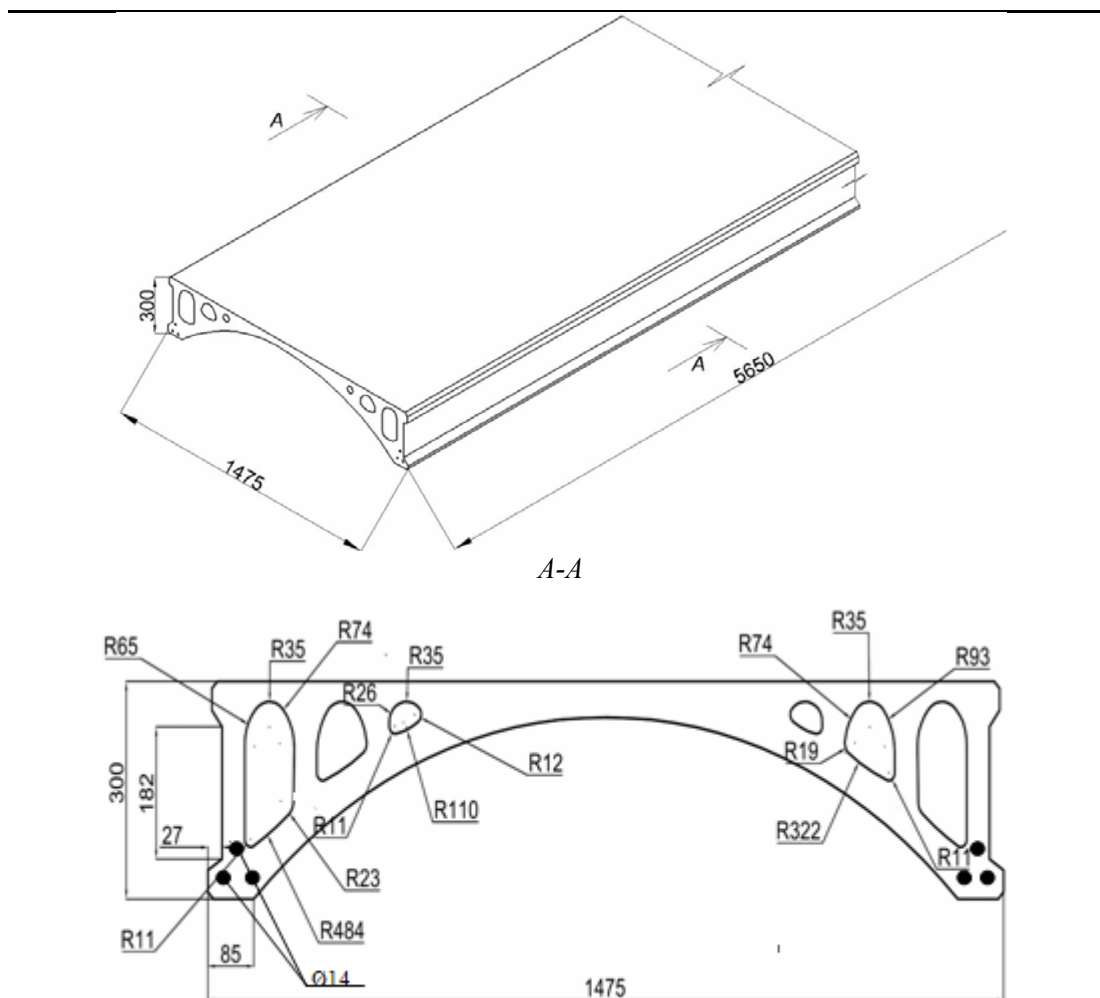


Рис. 1. Конструктивное решение плиты-оболочки

Таким образом, целью авторов становится сопоставление результатов, полученных ими при компьютерном моделировании напряженно-деформированного состояния в программных комплексах Ansys и ЛИРА [6] с результатами экспериментального исследования [7, 8] для железобетонной плиты-оболочки перекрытия с овальными пустотами в полке, разработанной ими, а также с результатами исследований аналогичных конструкций.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- 1) создать конечно-элементные схемы исследуемой плиты-оболочки в программных комплексах Ansys и ЛИРА, задать исходные данные для ее расчетов, выполнить расчеты;
- 2) назначить основные параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние исследуемой конструкции;
- 3) верифицировать результаты расчетов плиты-оболочки с пустотами в программных комплексах Ansys и ЛИРА с помощью результатов экспериментальных исследований;
- 4) сопоставить между собой результаты исследований различных плит-оболочек.

Материалы и методы. Одним из программных продуктов, позволяющих решать задачи расчета тонкостенных конструкций, применяемых в строительстве в основном в исследовательских целях, является программный комплекс Ansys [9, 10, 11, 12-15], конечно-элементные схемы в котором создаются автоматически.

Конечно-элементная схема исследуемой плиты-оболочки, используемая при ее расчете в программном комплексе Ansys, приведена на рис. 2. Количество конечных элементов в ней составляет 345992 штук, количество узлов – 585980 штук. Бетон

моделируется шестиузловыми и восьмиузловыми конечными элементами. В конечно-элементной схеме моделируется продольная рабочая арматура и предварительное напряжение, действующее в ней, приложенное в виде температурного воздействия.

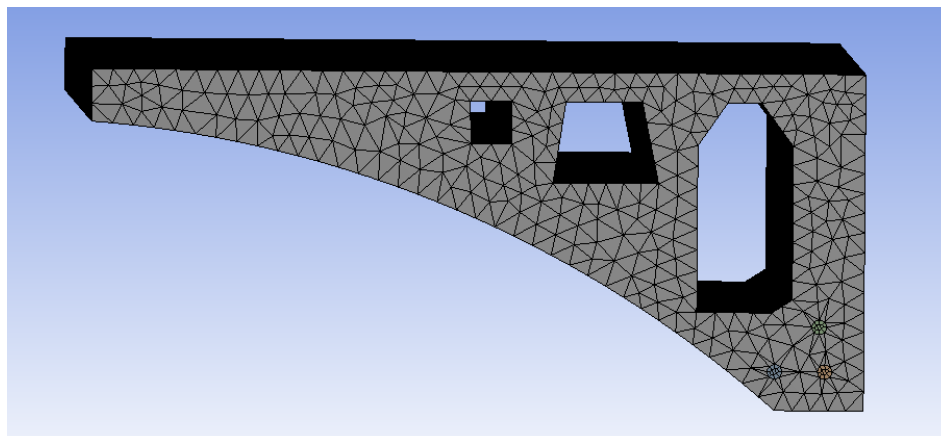


Рис. 2. Разбиение исследуемой плиты-оболочки на конечные элементы в программном комплексе Ansys

К верхней грани полки исследуемой плиты-оболочки приложена равномерно распределенная нагрузка с интенсивностью 24,1 кПа, а по всему ее объему – нагрузка от собственного веса.

При расчете конструкции проектируются горизонтальные связи в ее углу и в середине полки по ширине, моделирующие шарнирно неподвижное закрепление на опоре в нижней угловой точке и отсеченную часть полки.

Другими программными продуктами, используемыми в настоящее время для исследования и проектирования строительных конструкций, являются многофункциональные программные комплексы ЛИРА-САПР, ЛИРА-Софт, ScadOffice [16], конечно-элементные схемы в которых создаются авторами исследований.

Конечно-элементная схема исследуемой плиты-оболочки, применяемая при ее расчете в программном комплексе ЛИРА, приведена на рис. 3.

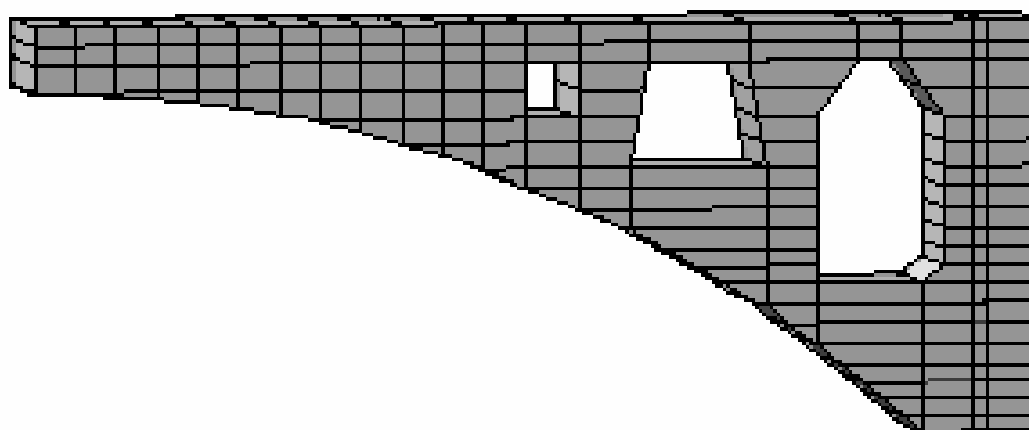


Рис. 3. Конечно-элементная схема, используемая при расчете исследуемой плиты-оболочки в программном комплексе ЛИРА

При расчете в программном комплексе ЛИРА использовались следующие типы конечных элементов: бетон – тип 236 – физически нелинейный универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический конечный элемент; арматурные стержни – тип 10 – универсальный пространственный стержневой конечный элемент с горизонтальными жесткими вставками. Восьмиузловые конечные элементы имеют различные размеры поперечного сечения, для стержневых – принят диаметр 14 мм.

Используемые законы деформирования материалов: бетон – 18 – нелинейный закон деформирования Гениева; стальная арматура – 11 – экспоненциальный закон деформирования.

Экспериментальное исследование выполнялось на железобетонных моделях, изготовленных с соблюдением единого масштабного коэффициента 1:5 в отношении генеральных размеров и размеров отдельных деталей конструкции (рис. 4).

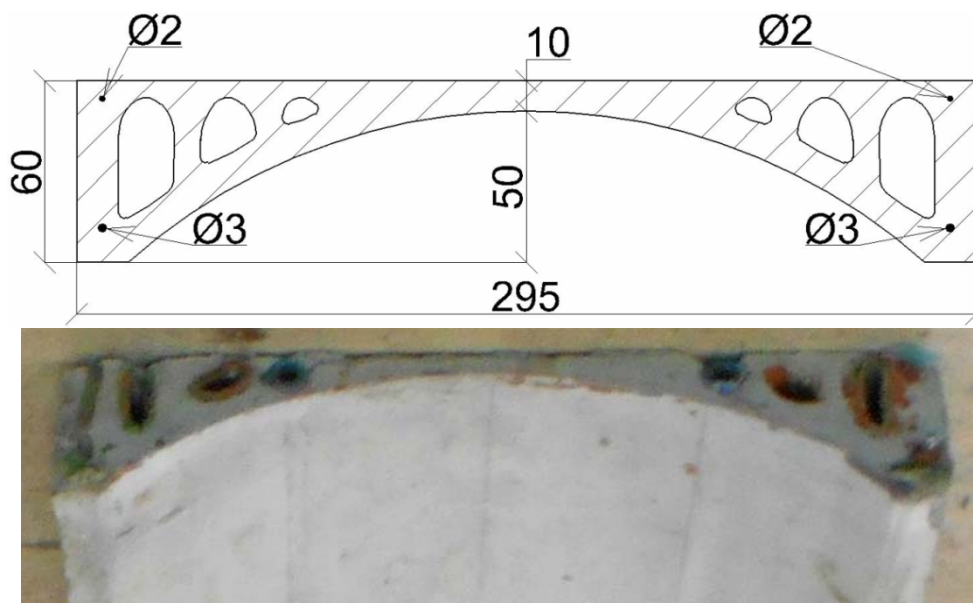


Рис. 4. Конструктивное решение модели исследуемой плиты-оболочки

В соответствии с указаниями п. 8.2.10 ГОСТ 8829-2018 [17] модели нагружались с помощью испытательной установки, в которой равномерно распределенная нагрузка заменялась эквивалентными нагрузками, создаваемыми четырьмя равными сосредоточенными силами (рис. 5).

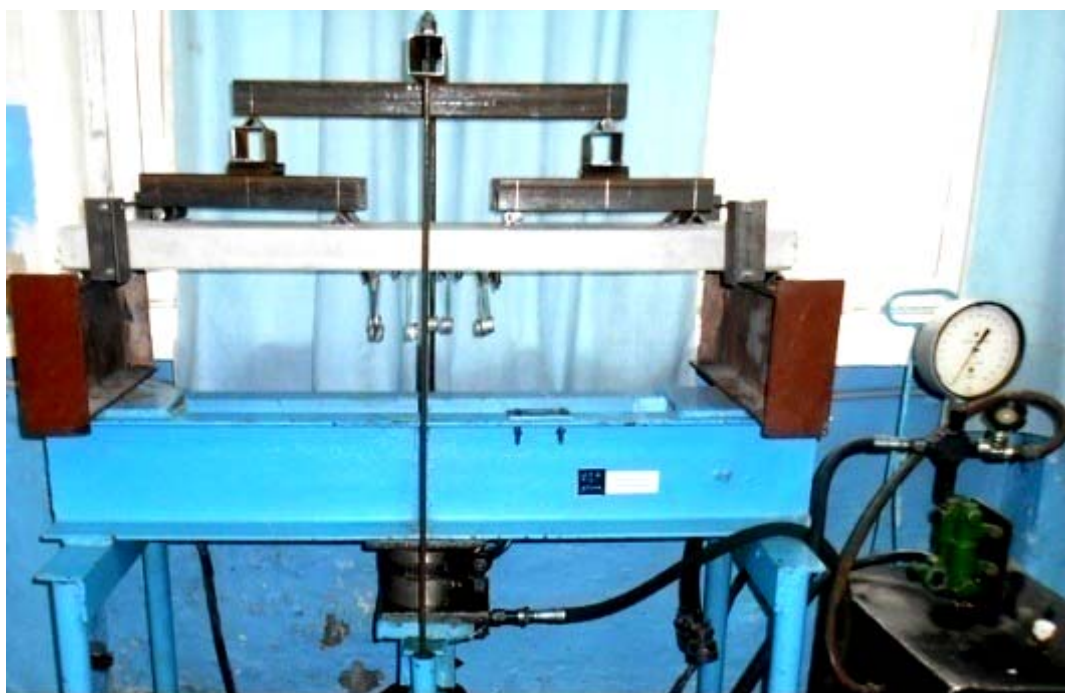


Рис. 5. Конструктивное решение испытательной установки

В процессе испытаний моделей фиксировались поперечные деформации, возникающие на нижней грани полки в районе середины пролета, изучалась последовательность образования трещин в ребрах и в полке, выявлялся характер работы конструкции в стадии предельного равновесия.

При анализе результатов компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции во внимание принимались следующие параметры:

- напряжения σ_y , возникающие во всей плите-оболочке в направлении пролета;
- напряжения σ_x , возникающие во всей плите-оболочке в поперечном направлении;
- напряжения $\left(\sigma_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)$, возникающие на нижней грани полки плиты-оболочки, в поперечном направлении, в районе середины ее пролета;
- прогибы полки плиты-оболочки в поперечном направлении в районе середины пролета $\left(w_{\frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)$;
- изгибающие моменты, возникающие на нижней грани полки плиты-оболочки в поперечном направлении, в районе середины ее пролета, определенные по результатам ее расчетов в пакетах программ Ansys $\left(\left(M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)^{\text{ANSYS}} \right)$ и ЛИРА $\left(\left(M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)^{\text{ЛИРА}} \right)$.

На основании результатов экспериментального исследования рассчитываются напряжения $\left(\sigma_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)^{\text{эксп.}}$ и изгибающие моменты $\left(M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)^{\text{эксп.}}$, возникающие на нижней грани полки натурной конструкции в поперечном направлении, в районе середины ее пролета.

Результаты исследований

Результаты компьютерного моделирования. При расчетах исследуемой конструкции в используемых программных комплексах установлено, что:

1) В направлении пролета исследуемая плита-оболочка работает по схеме предварительно напряженной балки.

Вблизи опоры под действием усилия предварительного напряжения и влияния элементов, сдерживающих поперечные деформации продольных контурных ребер, в ее полке возникают главные напряжения, направленные диагонально, являющиеся на нижней грани полки сжимающими, а на верхней грани – растягивающими, превышающими расчетное сопротивление бетона растяжению R_{bt} .

По мере приближения к середине пролета конструкции она прогибается вниз, и незначительные продольные сжимающие напряжения возникают по всей толщине ее полки. В середине пролета конструкции на нижней грани полки вблизи линии ее сопряжения с продольным контурным ребром появляются максимальные растягивающие напряжения, значительно превосходящие расчетное сопротивление R_{bt} , а на верхней грани полки – максимальные сжимающие напряжения, не превышающие расчетное сопротивление бетона сжатию R_b .

2) В поперечном направлении плита-оболочка работает на изгиб между продольными контурными ребрами. Ее полка почти по всей длине конструкции незначительно сжата по всей своей толщине на большей части ширины конструкции. Растягивающие напряжения, незначительно превосходящие расчетное сопротивление R_{bt} , появляются только на нижней грани тонкого участка полки в районе середины конструкции по ширине.

В середине пролета конструкции возникают растягивающие напряжения $\left(\sigma_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)$,

действующие почти по всей ширине полки и напрямую зависящие от толщины плиты в каждом сечении.

Описанный выше характер напряженно-деформированного состояния обусловлен наличием закрепления плиты-оболочки в поперечном направлении на опорах и высокой жесткостью предварительно напряженного продольного контурного ребра, позволяющих ограничивать его перемещения в поперечном направлении от опоры до середины пролета.

С учетом описанного выше характера напряженно-деформированного состояния можно сказать, что разрушение плиты-оболочки начинается после того, как напряжения σ_y , возникающие в конечных элементах, расположенных в середине пролета ее продольного контурного ребра, достигают значения расчетного сопротивления R_{bt} . После этого происходит перераспределение предельных напряжений σ_y по длине продольного контурного ребра, и предельные продольные и поперечные напряжения возникают в полке конструкции вблизи ее опоры, что приводит к появлению в этой зоне главных растягивающих и сжимающих напряжений, превосходящих расчетные сопротивления R_b и R_{bt} , действующих по диагонали.

Завершается разрушение конечно-элементной модели после того, как предельные напряжения σ_x развиваются по всей длине полки в средней ее части по ширине.

Результаты экспериментальных исследований плит-оболочек и цилиндрических оболочек, выполненных различными авторами. Испытания исследуемой плиты-оболочки, выполненные авторами, а также испытания аналогичных конструкций, выполненные другими авторами, показали следующие результаты.

При испытаниях моделей разработанной конструкции было установлено [8], что аналогично изгибаемым элементам прямоугольного сечения по мере роста нагрузки она проходит три стадии напряженно-деформированного состояния: первую – упругую стадию работы бетона на растяжение в нижней части продольных контурных ребер; вторую – стадию образования и раскрытия трещин; третью – стадию разрушения.

Первая стадия наблюдается при нагрузке

$$q_0 \leq q_1 < q_{crc}, \quad (1)$$

где q_0 – суммарная нагрузка, складывающаяся из нагрузки от собственной массы модели и нагрузки от собственной массы испытательной установки, опирающейся на нее; q_{crc} – нагрузка, соответствующая моменту образования трещины в продольных ребрах, составляющая согласно экспериментам $q_{crc}=(0.51\dots 0.62) \cdot q_u$; здесь q_u – предельная (разрушающая) нагрузка, составляющая в среднем $q_u=13,8$ кПа.

Вторая стадия установлена при нагрузке

$$q_{crc} \leq q_2 < q_u. \quad (2)$$

Исследования деформаций показали, что на второй стадии происходит изменение напряженно-деформированного состояния плиты-оболочки: в приопорной зоне продольного контурного ребра с образованием трещин появляется пластический шарнир, что приводит к постепенному отключению распора. Полка плиты-оболочки постепенно разделяется на две области.

На этой стадии в районе середины пролета конструкции возникает поперечный изгибающий момент, величина которого остается незначительной практически до разрушения конструкции. При этом установлена прямая связь между шириной раскрытия трещины в продольном контурном ребре и величиной поперечного изгибающего момента.

Третья стадия установлена при нагрузке

$$q_3 \cong q_u \cdot \quad (3)$$

Разрушение модели плиты-оболочки начинается с разрушения продольных контурных ребер вследствие нарушения анкеровки арматуры с последующим ее продергиванием.

Далее происходит разрушение бетона в полке, начинающееся с образования сквозных диагональных трещин, заканчивающееся образованием сквозной продольной трещины в середине полки по ширине.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства при испытаниях моделей пустотной панели покрытия с торцевыми ребрами с ненапрягаемой арматурой, с размерами в плане 0,745×1,495 м установлено [18], что первые нормальные трещины в средней части ребер появились при нагрузке, составляющей 0,63 контрольной по прочности, и в дальнейшем развивались очень незначительно, продольные трещины в тонкой части полки отсутствовали.

Незадолго до разрушения конструкции в угловых зонах полки появились диагональные трещины, характерные для угловых зон цилиндрических оболочек и плит, опертых по контуру.

Одна из моделей разрушилась от проскальзывания продольной арматуры в приопорной зоне ребер, другая – от разрыва продольной арматуры в середине пролета. Разрушения полки в поперечном направлении достигнуть не удалось.

Описанные выше схемы образования трещин совпадают со схемой их образования в большепролетной цилиндрической оболочке, описанной в п. 9.7 СП 387.1325800.2018 [4]: расчет этой конструкции по прочности, жесткости и трещиностойкости следует производить с учетом образования трещин в бортовых элементах и в плите, а также трещин вдоль образующих в плите или трещин в поперечных ребрах в соответствии с методиками, изложенными в СП 63.13330. Допускается не учитывать при расчете косые трещины в углах.

Сравнение результатов исследований различных плит-оболочек. Эпюры изгибающих моментов $M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}}$, полученных авторами экспериментально для исследуемой

плиты-оболочки и при компьютерном моделировании ее напряженно-деформированного состояния, а также другими исследователями для аналогичных конструкций, сопоставляются на рис. 6, а их численные значения – в таблице.

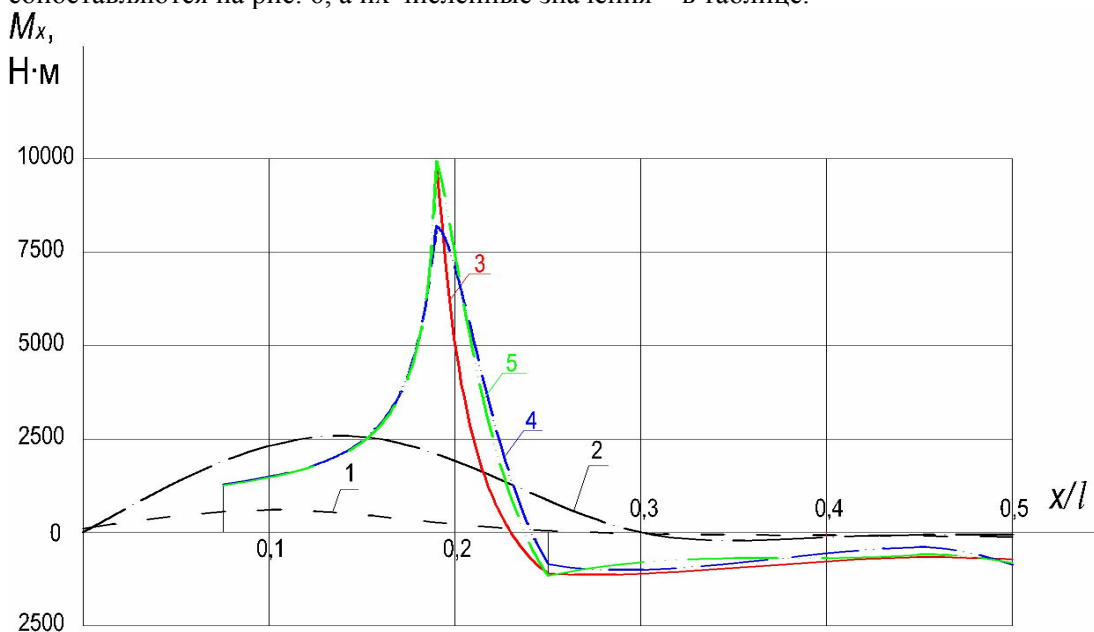
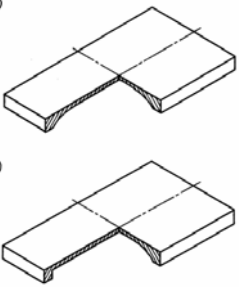
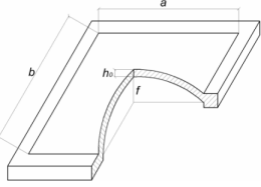
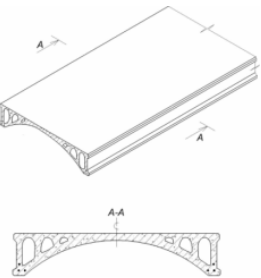


Рис. 6. Сравнение эпюр поперечных изгибающих моментов $M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}}$, полученных различными авторами

Численные значения поперечных изгибающих моментов $M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}}$,

полученные различными авторами

№ эпоры на рис. 6	Источники и описание конструкций	Метод получения результатов	Результаты								
			Относительное расстояние от линии сопряжения полки с продольным контурным ребром $\frac{x_i}{b_{\text{полка}}}$								
			0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5			
1	Боровских А.В. [19] 	Расчет	$M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}}$, Н·м	-100	-600	-220	-40	80	120		
2	Бастатский Б.Н., Барабадзе Н.Г., Адамова М.А. [20] 	Расчет	$M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}}$, Н·м	0	-1794,8	-2564	-1923	0	128,2	64,1	
	Результаты авторов (исследуемая плита-оболочка) [5, 6, 7, 8]		Результаты								
3		Эксперимент	$\left(M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)^{\text{эксп.}}$, Н·м	---	---	---	---	-9969,4	1102	709,3	725,5
4		Расчет в ПП ANSYS	$\left(M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)^{\text{Ansys}}$, Н·м	---	-1290,3	-2926,9	-6724,1	-8222,2	848,8	397,1	859,1
5		Расчет в ПП ЛИРА	$\left(M_{x, \frac{l}{2}}^{\text{полка}} \right)^{\text{ЛИРА}}$, Н·м	---	-1264,5	-2885,6	-6993,1	-9961,1	1170,7	597,5	825,4

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что эпюра рассматриваемых изгибающих моментов характеризуется двумя экстремальными точками, одна из которых соответствует максимальным значениям отрицательных моментов, концентрирующихся в угловых зонах, а другая – положительных, имеющих место в четвертях и в центре панели. Как видно из рис. 6, сопоставление результатов, полученных авторами данной работы экспериментально и при компьютерном моделировании напряженно-деформированного состояния, с результатами других авторов показало схожую качественную картину деформаций, при этом значения существенно различались, что связано с различиями в размерах конструкций в плане, условиях их опирания, величинах нагрузок.

Выводы. Анализ результатов выполненных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции показало хорошую сходимость результатов, полученных при ее расчетах в различных программных продуктах, с результатами экспериментальных исследований, выполненных авторами и другими исследователями для аналогичных конструкций.

2. Механизм разрушения разработанной плиты-оболочки, выявленный авторами экспериментально, хорошо согласуется с результатами, полученными другими авторами для плит-оболочек с аналогичными размерами в плане и для большепролетных цилиндрических оболочек.

3. Сопоставление результатов, полученных нами экспериментально, в программных комплексах ЛИРА и Ansys, с результатами других авторов показало схожую качественную картину деформаций, при этом значения существенно различались, что связано с рядом особенностей.

Список литературы

1. Серия 1.042.1-5.94. Сборные железобетонные ребристые плиты высотой 300 мм для перекрытий многоэтажных общественных зданий, производственных и вспомогательных зданий промышленных предприятий. Т. 1. Плиты длиной 5650 мм, шириной 2985, 1485 и 935 мм. – М.: ЦНИИПромзданий, 1994. – 70 с.

2. Копша, С.П. Технология безопалубочного формования – ключ к модернизации промышленности и снижению себестоимости жилья / С.П. Копша, В.А. Заикин // Технологии бетонов. – 2013. – № 11. – С. 29–33.

3. Власов В.З. Избранные труды / В.З. Власов. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – Т. 1. – 528 с.

4. СП 387.1325800.2018. Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Правила проектирования.

5. Селиванов, А.В. Железобетонная плита-оболочка. Полезная модель РФ № 166449. МПКЕ 04 В 5/43. / А.В. Селиванов, Ф.Ф. Регер. – Опубл. 11/27/2016. Бюл. № 33.

6. Селиванов, А.В. О влиянии конструктивных особенностей на напряженно-деформированное состояние (НДС) железобетонной плиты-оболочки перекрытия / А.В. Селиванов, Ф.Ф. Регер, И.А. Чакурин // Вестник СибАДИ. – 2022. – № 19(3). – С. 446 – 460.

7. Селиванов, А.В. Результаты экспериментальных исследований железобетонной плиты-оболочки / А.В. Селиванов, Ф.Ф. Регер // Вестник СибАДИ. – 2019. – № 16(3). – С. 378–392.

8. Селиванов, А.В. Исследование трещинообразования и предельного равновесия железобетонной плиты-оболочки перекрытия / А.В. Селиванов, Ф.Ф. Регер, И.А. Чакурин // Вестник СибАДИ. – 2022. – № 19(5). – С. 762–776.

9. Шкловец, А.О. Работа в САЕ-пакете ANSYSMECHANICAL: конструкционный анализ методом конечных элементов / А.О. Шкловец, В.С. Мелентьев. – Самара, 2018. – 76 с.

10. Каплун, А.Б. Ansys в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М., 2003. – 272 с.
11. Федорова, Н.Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М., 2017. – 210 с.
12. Мирсаяпов, Илшат Т. Численный анализ нелинейного поведения железобетонных конструкций на твердотельных моделях / Илшат Т. Мирсаяпов, Г.Т. Апхадзе, В.Д. Симаков. – Казань, 2023. – 211 с.
13. Мирсаяпов, Илшат Т. Перемещение арматуры периодического профиля в заделке при статическом нагружении / Илшат Т. Мирсаяпов, Р.И. Минзянов // Известия КГАСУ. – 2022. – № 4 (62). – С. 18–29.
14. Мирсаяпов, Илшат Т. Численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта бетона и арматуры при статическом нагружении / Илшат Т. Мирсаяпов, Р.И. Минзянов, А.М. Зайнутдинов // Известия КГАСУ. – 2023. – №3 (65). – С. 122–134.
15. Мирсаяпов, Илшат Т. Перемещение арматуры в уплотнениях при статической нагрузке / Илшат Т. Мирсаяпов, Рустам Минзянов // Серия конференций IOPS ТССЕ-2020: Материаловедение и инженерия, 2020.
16. Ковальчук, О.А. Знакомство с программным комплексом ЛИРА 10.4 / О.А. Ковальчук, А.В. Колесников, Е.М. Русанова, Р.Н. Суворов.
17. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости трещиностойкости.
18. Баранова, Т.И. Пустотная панель покрытий производственных зданий / Т.И. Баранова, Т.Г. Сильванович, В.Г. Викторов, А.Н. Бормотов // Известия ВУЗов. Строительство. – 1995. – № 11. – С. 3–6.
19. Боровских, А.В. К вопросу о проектировании железобетонных перекрытий зданий / А.В. Боровских // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 12(83). – С. 67–70.
20. Бастатский, Б.Н. О выборе формы поперечного сечения вспарушенных плит / Б.Н. Бастатский, Н.Г. Барабадзе, М.А. Адамова // Пространственные конструкции зданий и сооружений. – 1985. – Вып. 5. – С. 128–133.

References

1. Series 1.042.1-5.94. Prefabricated reinforced concrete ribbed slabs 300 mm high for floors of multi-storey public buildings, production and auxiliary buildings of industrial enterprises. Vol. 1. Plates with a length of 5650 mm, a width of 2985, 1485 and 935 mm. – М.: Central Research Institute of Industrial Buildings, 1994. – 70 p.
2. Kopsha, S.P. Formless molding technology is the key to modernizing industry and reducing housing costs / S.P. Kopsha, V.A. Zaikin // Concrete Technologies. – 2013. – No11. – P. 29–33.
3. Vlasov, V.Z. Selected works / V.Z. Vlasov. – М.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. – Vol. I. – 528 p.
4. SP 387.1325800.2018. Reinforced concrete spatial structures of coverings and floors. Design rules.
5. Selivanov, A.V. Utility model 166449 RF: МРК Е 04 В 5/43: Reinforced concrete slab-shell / A.V. Selivanov, F.F. Reger. – Publ. 11/27/2016. Bulletin.No. 33.
6. Selivanov, A.V. On the influence of design features on the stress-strain state (SSS) of a reinforced concrete floor slab-shell / A.V. Selivanov, F.F. Reger, I.A. Chakurin // SibADI Bulletin. – 2022. – No19(3). – P. 446–460.
7. Selivanov, A.V. Results of experimental studies of reinforced concrete slab-shell / A.V. Selivanov, F.F. Reger // SibADI Bulletin. – 2019. – No16(3). – P. 378–392.
8. Selivanov, A.V. Study of crack formation and limit equilibrium of a reinforced concrete slab-shell floor / A.V. Selivanov, F.F. Reger, I.A. Chakurin // SibADI Bulletin. – 2022. – No19(5). – P. 762–776.

-
9. Shklovets, A.O. Working in the CAE package ANSYS MECHANICAL: structural analysis using the finite element method / A.O. Shklovets, V.S. Melentyev. – Samara, 2018. – 76 p.
 10. Kaplun, A.B. ANSYS in the hands of an engineer: a practical guide / A.B. Kaplun, E.M. Morozov, M.A. Olfereva. – M., 2003. – 272 p.
 11. Fedorova, N.N. Basics of working in ANSYS 17 / N.N. Fedorova, S.A. Valger, M.N. Danilov, Yu.V. Zakharova. – M., 2017. – 210 p.
 12. Mirsayapov, Ilshat T. Numerical analysis of nonlinear behavior of reinforced concrete structures on solid models / Ilshat T. Mirsayapov, G.T. Apkhadze, V.D. Simakov. – Kazan, 2023. – 211 p.
 13. Mirsayapov, Ilshat T. Movement of periodic profile reinforcement in embedding under static loading / Ilshat T. Mirsayapov, R.I. Minzyanov // Izvestia KGASU. – 2022. – No4 (62). – P. 18–29.
 14. Mirsayapov, Ilshat T. Numerical study of the stress-strain state in the contact zone of concrete and reinforcement under static loading / Ilshat T. Mirsayapov, R.I. Minzyanov, A.M. Zainutdinov // News of KGASU. – 2023. – No 3(65). – P. 122–134.
 15. Mirsayapov, Ilshat. Rebar movement in seals under static loading / Ilshat Mirsayapov, Rustam Minzianov.// STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
 16. Kovalchuk, O.A. Introduction to the LIRA software package 10.4 / O.A. Kovalchuk, A.V. Kolesnikov, E.M. Rusanova, R.N. Suvorov.
 17. GOST 8829-2018. Pre-fabricated reinforced concrete and concrete products. Load test methods. Rules for assessing strength, stiffness and crack resistance.
 18. Baranova, T.I. Hollow panel coverings of industrial buildings. News of universities / T.I. Baranova, T.G. Silvanovich, V.G. Viktorov, A.N. Bormotov // Construction. – 1995. – No11. – P. 3–6.
 19. Borovskikh, A.V. On the issue of designing reinforced concrete floors of buildings / A.V. Borovskikh // Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2005. – No 12(83). – P. 67–70.
 20. Bastatsky, B.N. On the choice of the cross-sectional shape of steamed slabs / B.N. Bastatsky, N.G. Barabadze, M.A. Adamova // Spatial structures of buildings and structures. – 1985. – Release 5. – P. 128–133.

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

Петров Алексей Анатольевич,
магистрант

Самошин Андрей Павлович,
кандидат технических наук, доцент

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Petrov Aleksey Anatolyevich,
Master's student

Samoshin Andrey Pavlovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕСТНИЦЫ ДЛЯ МАЛОЭТАЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А.А. Петров, А.П. Самошин

Статья посвящена основам конструирования лестниц в ограниченном пространстве с крутым углом подъёма. В качестве примера рассмотрены два типа лестниц: прямой марш, радиусная лестница.

Ключевые слова: моделирование, план лестницы, радиусная лестница, лестница с прямым маршем

DESIGNING A STAIRWAY FOR LOW-RISE CONSTRUCTION IN LIMITED SPACE

A.A. Petrov, A.P. Samoshin

The article is devoted to the basics of designing stairs in a confined space with a steep angle of ascent. Two types of stairs are considered as an example: a straight march, a radius staircase.

Keywords: modeling, ladder plan, radius ladder, ladder with a straight march

При проектировании лестниц для малоэтажных домов возникает задача вписать в имеющиеся по факту габариты проема лестницу, размеры которой не позволяют запроектировать ее по классической схеме.

Анализ технической литературы по конструированию лестниц позволяет классифицировать лестницы по назначению в зависимости от их угла подъема. Классификация лестниц по назначению в зависимости от угла подъема представлена на рис. 1 [1...4].

Исходя из практики конструирования, эта зависимость в большинстве случаев выполнима. Однако возникают ситуации, когда для конструирования лестницы необходимо учитывать габариты помещения и размеры проемов, в которые невозможно уместить лестницу с углом подъема менее 60 градусов.

Существуют две основные формулы для расчета лестниц: формула удобства и формула безопасности. В специализированной литературе диапазоны значений упоминаемых зависимостей могут незначительно различаться, поэтому на практике рекомендуется ориентироваться на средние значения. Они получены исходя из среднего шага человека (600-650 мм). Эти формулы зависят от проступи (B) и высоты подступенка лестницы (H).

Формула удобства: $2H+B=600-650$ мм.

Формула безопасности: $H+B=400-450$ мм.

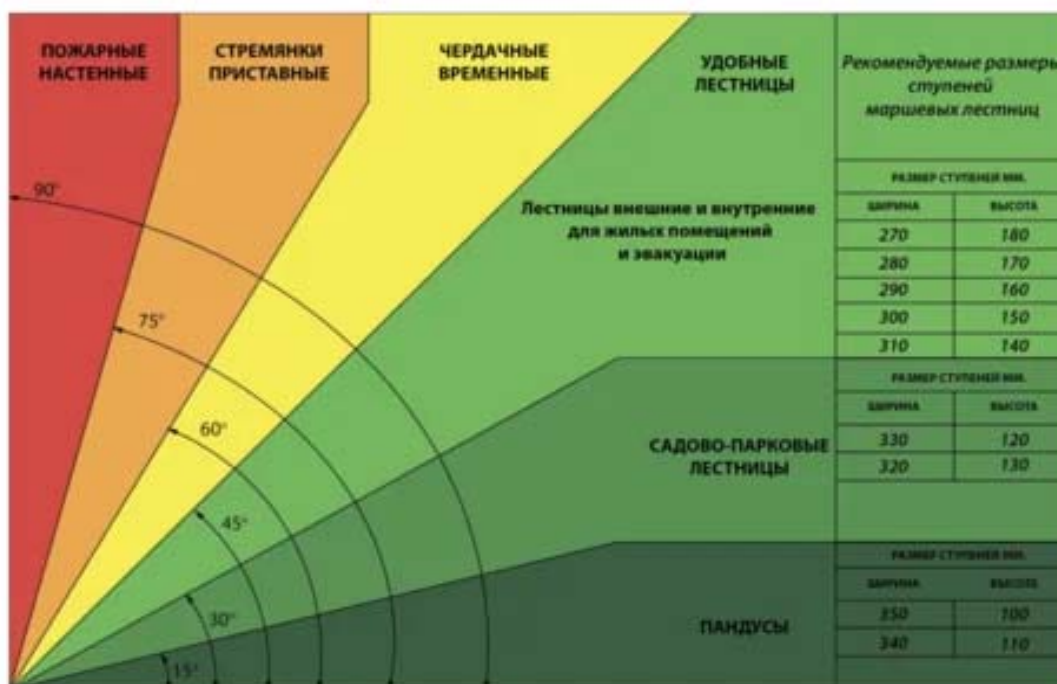


Рис. 1. Классификация лестниц по назначению в зависимости от угла подъема

Графическая иллюстрация параметров, входящих в указанные зависимости, представлена на рис. 2.

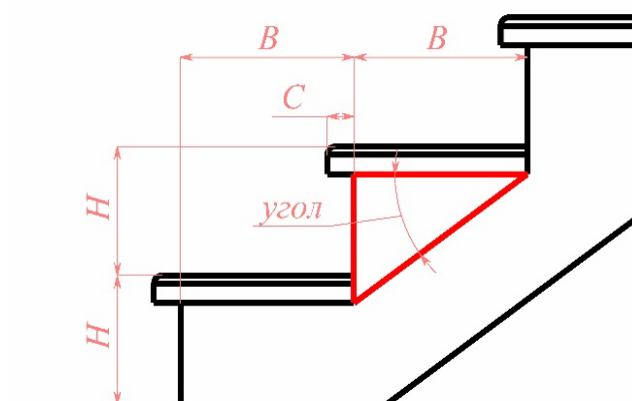


Рис. 2. Расчетные параметры лестниц

Нависание (C) задается в промежутке от 20 до 50 мм. На практике обычно нависание принимается равным 40 мм, что обусловлено эстетикой, габаритами исходных щитов и возможностью установки подсветки [5].

В статье [5] приведены общие методы проектирования лестниц, актуальные при их построении с большим углом подъема. На практике часто возникает задача вписать лестницу в ограниченное пространство, размеры которого не позволяют запроектировать конструкцию по классической схеме, исходя из учета нормируемых параметров. Это приводит к компромиссным решениям, таким, как уменьшение критической высоты (высота от крайней ступени до потолка) ниже двух метров, а также уменьшение ширины лестницы.

В лестницах с углом подъема более 55 градусов при расчете ее плана расчетная проступь зачастую составляет менее 190 мм, единственным вариантом спроектировать лестницу с максимальным удобством для эксплуатации является построение по типу

«утиный шаг». Расчетный план и общий вид сверху одномаршевой лестницы с углом подъема 70 градусов представлен на рис. 3.

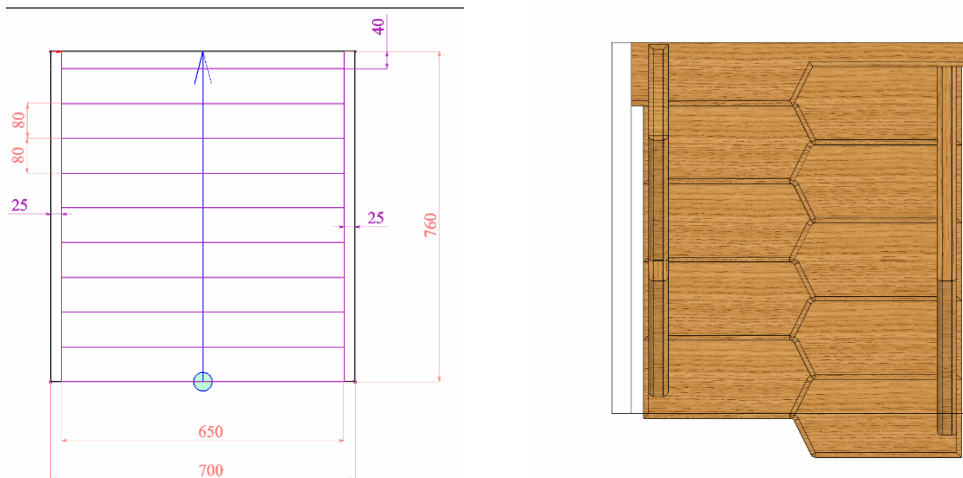


Рис. 3. Расчетный план и общий вид сверху одномаршевой лестницы с углом подъема 70 градусов

Основным принципом построения по типу «утиный шаг» является расположение одной фактической проступи на двух расчетных. Также важно наличие верхней фризовой ступени, без которой спуск по такой лестнице был бы менее безопасный.

Разрез и общий вид одномаршевой лестницы изображены на рис. 4.

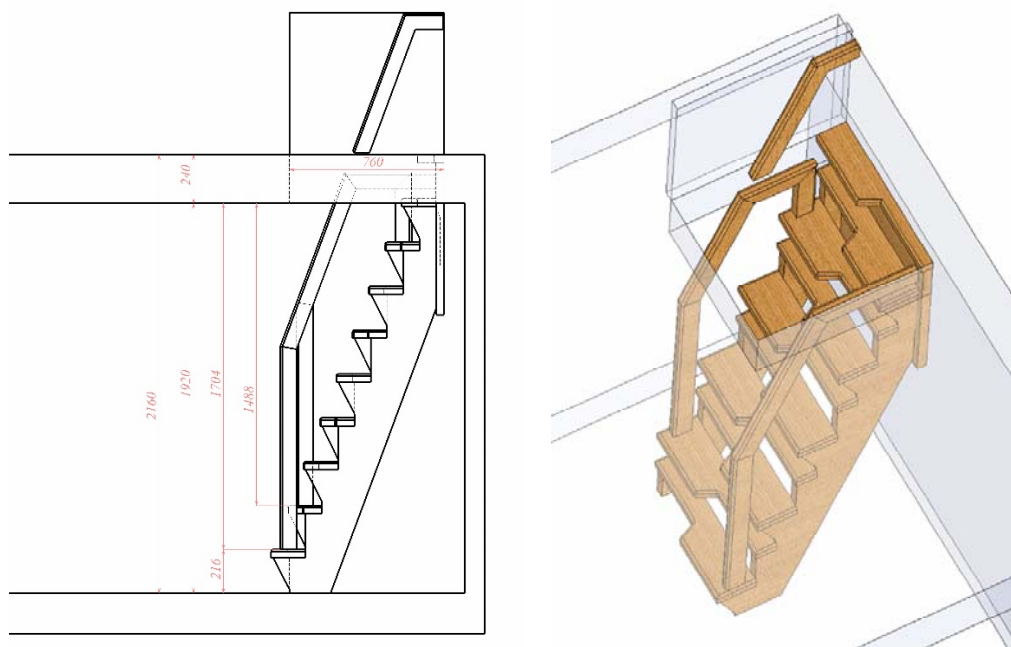


Рис. 4. Разрез и общий вид одномаршевой лестницы

Построение лестницы «утиный шаг» часто применяется не только в одномаршевых лестницах, но и в Г-образных и П-образных. На рис. 5 и 6 представлены план, разрез и общий вид Г-образной лестницы «утиный шаг».

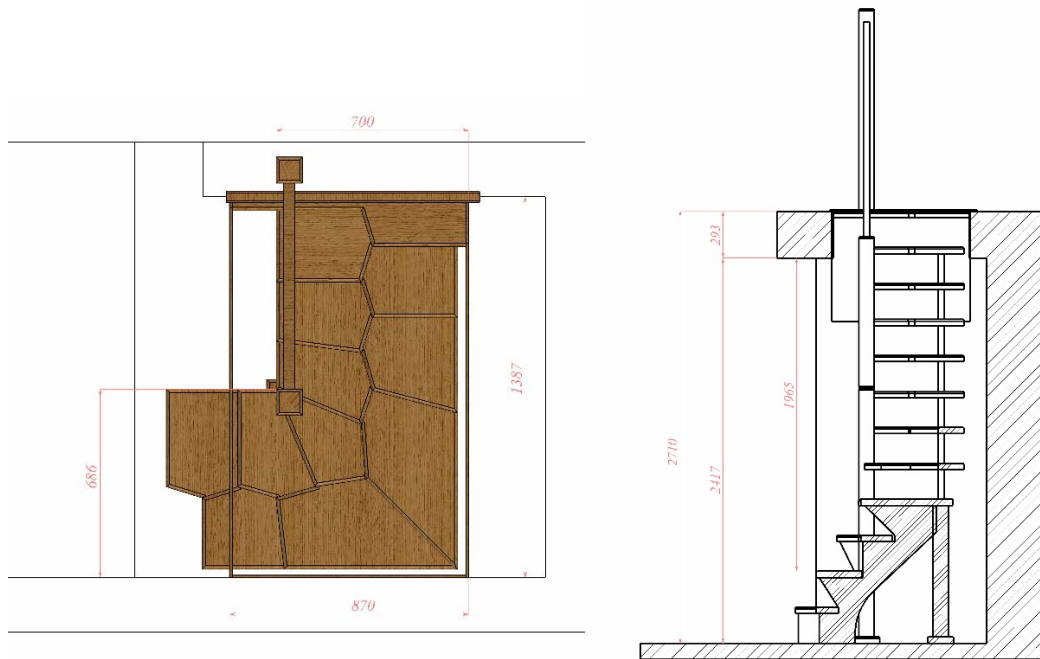


Рис. 5. План и разрез одномаршевой лестницы

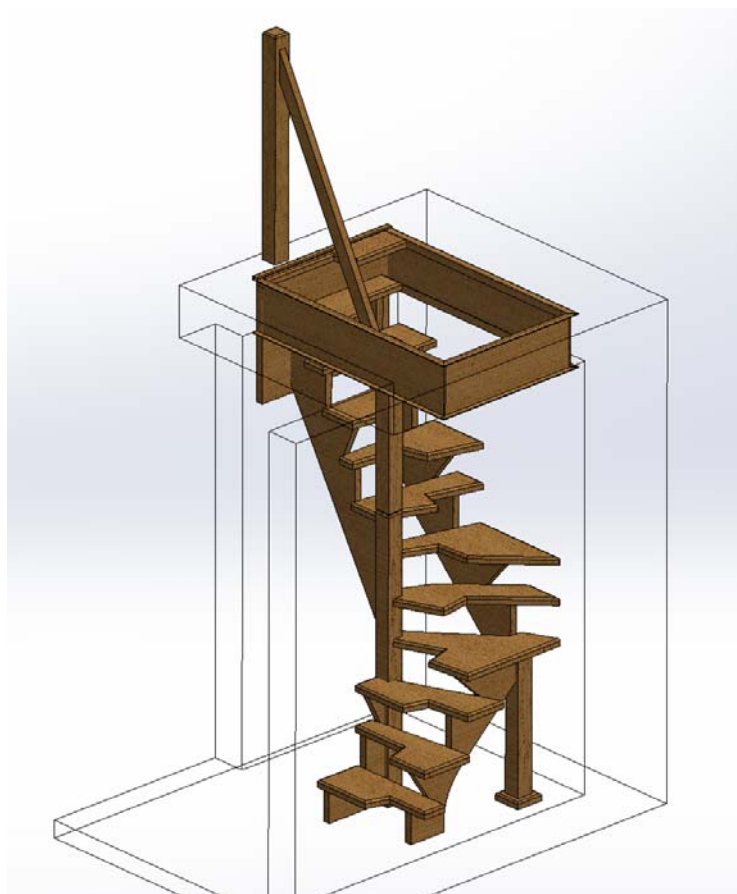


Рис. 6. Общий вид Г-образной лестницы «утиный шаг»

В более простых случаях возможно частичное изменение конструкции, такое, как расширение марша на выходе с лестницы или расширение ступеней на заходе на лестницу. На рис. 7 показаны план и общий вид лестницы с расширением ступеней к выходу, что обусловлено близким расположением двери к последней ступени. В

данном примере расширение начато с 4 ступени второго марша, чтобы не уменьшать его ширину. На рис. 8 приведено фото лестницы с изменяемой шириной марша на выходе.

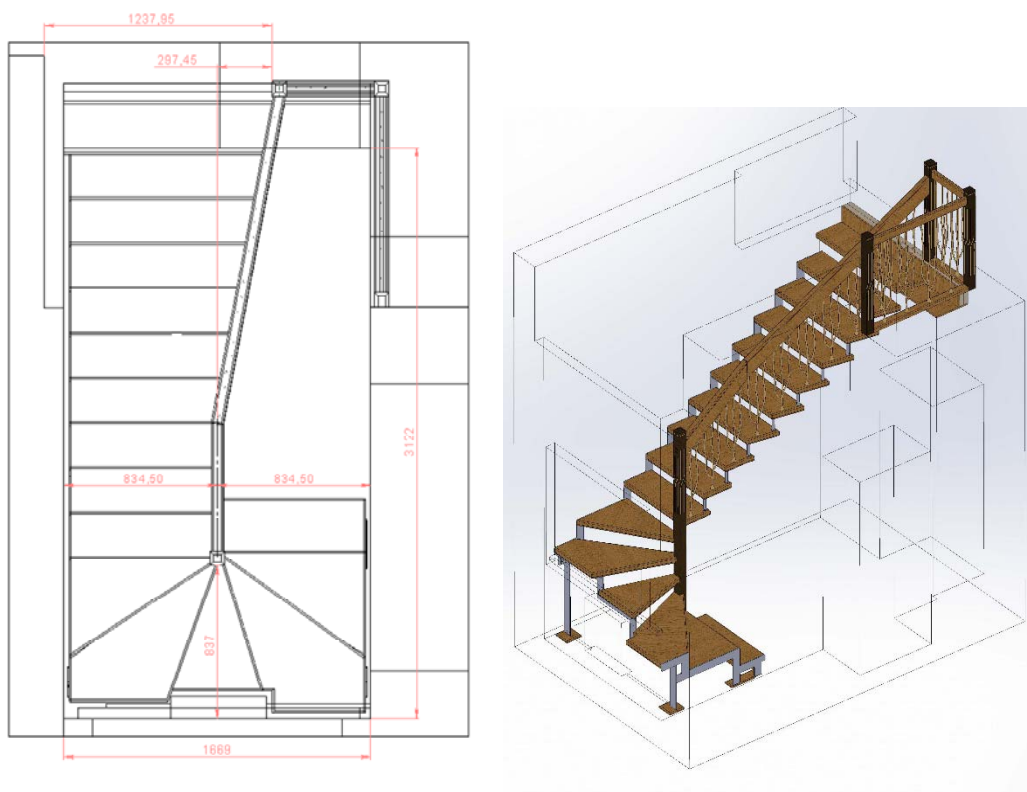


Рис. 7. План и общий вид лестницы с изменяемой шириной марша на выходе



Рис. 8. Фото лестницы с изменяемой шириной марша на выходе

На рассмотренных примерах видно, что с использованием предлагаемых приемов проектирования лестниц можно получить проект, выполнение которого позволит сделать их эксплуатацию безопасной и удобной.

Список литературы

1. Савельев, А.А. Лестницы. Расчет и монтаж / А.А. Савельев. – М.: Аделант, 2010. – 97 с.
2. Маркова, М.В. Проектирование лестниц / М.В. Маркова; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2021. – 71 с.
3. Тюкавкина, И.Л. Проектирование лестниц в жилых и общественных зданиях / И.Л. Тюкавкина. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. – 68 с.
4. Столяров, А.Н. Строим лестницы / А.Н. Столяров. – М.: Цитадель-трейд, 2006. – 64 с.
5. Петров, А.А. Основы проектирования лестниц для жилого малоэтажного строительства / А.А. Петров, Р.В. Тарасов // Вестник ПГУАС: Строительство, наука и образование. – 2023. – №2. – С. 42–47.

References

1. Saveliev, A.A. Stairs. Calculation and installation / A.A. Saveliev. – M.: Adelant, 2010. – 97 p.
2. Markova, M.V. Designing stairs / M.V. Markova; M-vo transp. and Communications Rep. Belarus, Belarus. State University of Transport. – Gomel: BelGUT, 2021. – 71 p.
3. Tyukavkina, I.L. Designing stairs in residential and public buildings / I.L. Tyukavkina. – Khabarovsk: Publishing House of the Pacific State University, 2012. – 68 p.
4. Stolyarov, A.N. Building ladders / A.N. Stolyarov. – M.: Citadel-trade, 2006. – 64 p.
5. Petrov, A.A. Fundamentals of staircase design for residential low-rise construction / A.A. Petrov, R.V. Tarasov // Bulletin of PGUAS: Construction, science and education. – 2023. – No. 2. – P. 42–47.

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

Шурыгин Илья Сергеевич,

магистрант

E-mail: techbeton@pguas.ru

Береговой Виталий Александрович,

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Shurygin Ilya Sergeevich,

Master's Student

E-mail: techbeton@pguas.ru

Beregovoy Vitaly Aleksandrovich,

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

СПОСОБЫ ДЕЛИГНИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ДРЕВЕСНО-СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКОВ

И.С. Шурыгин, В.А. Береговой

В рамках технологии получения прозрачных древесно-слоистых пластиков проведен анализ применимости существующих реагентов делигнифицирования древесины. Предложен подход для оценки пригодности древесных пород в качестве субстрата композиционного слоистого материала, основанный на величине их влагопроводности. Составлен перечень полимеров для пропитки отбеленного древесного шпона с целью выработки светопрозрачных видов фанеры.

Ключевые слова: технология, делигнификация, светопрозрачность, древесно-слоистые пластики

METHODS OF BLEACHING HARDWOOD TO PRODUCE TRANSPARENT WOOD-LAMINATED PLASTICS

I. S. Shurygin, V.A. Beregovoy

Within the framework of the technology for producing transparent wood-laminated plastics, the applicability of existing wood delignification reagents has been analyzed. An approach is proposed to assess the suitability of wood species as a substrate of composite layered material based on the value of their moisture conductivity. A list of polymers has been compiled for impregnating bleached wood veneer in order to produce translucent types of plywood.

Keywords: technology, delignification, translucency, wood-laminated plastics

Древесина относится к важнейшим конструкционным материалам природного происхождения с ежегодно возобновляемым ресурсом. Согласно опубликованным данным общая расчетная лесосека страны превышает 650 млн м³, а в региональном разрезе по Пензенской области она превышает 1,1 млн м³. Фактический среднегодовой объем лесозаготовки ограничен 200 млн м³, из которых 2/3 приходится на древесину хвойных пород [1]. Маловостребованные промышленностью лиственные породы (осина, береза, тополь и т.п.) ежегодно остаются и, накапливаясь, ухудшают бонитет леса, его экологию и пожарную безопасность.

Преимуществами древесины являются высокий коэффициент конструктивного качества, экологичность, теплофизические свойства, технологичность обработки и монтажа конструкций. Все это предопределило широкое распространение клееных деревянных конструкций в качестве несущих элементов каркаса зданий, способных воспринимать значительные изгибающие нагрузки. В связи с развитием солнечной энергетики и повышением требований к эстетической составляющей объектов

строительства существенным ограничением является неспособность древесины и клееных материалов на ее основе к эффективному пропусканию света. Прозрачная древесина имеет широкий потенциал использования – от деревянной мебели и декоративных элементов интерьера до конструкционных материалов в транспорте и оптоэлектронике.

В настоящем исследовании изучается вопрос получения прозрачных древесно-слоистых пластиков с коэффициентом оптического пропускания свыше 65 %. Существующие способы получения таких материалов включают процессы удаления лигнина и красящих экстрактивных компонентов с последующей пропиткой освобожденного внутреннего объема светопрозрачным полимером. Традиционно модификацию древесины олигомерами и полимерами проводят с целью повышения долговечности при сохранении большинства положительных характеристик. Наиболее опасные деструктивные процессы активируются в древесине при наличии чрезмерного увлажнения (биокоррозия) или высокой температуры (термолиз).

Эффективность химической обработки и способность модифицированной древесины пропускать световые лучи связана с особенностью микроструктуры материала, которая зависит от породно-размерных характеристик. Анализ опубликованных работ [2, 3] показывает, что для выработки древесного субстрата в рамках технологии прозрачной древесины предпочтительно использовать светлоокрашенные листовые (бальза, береза, липа, осина) и хвойные (ель обыкновенная, пихта сибирская) породы. Преимуществом обладают породы с высоким коэффициентом конструктивного качества, например для древесины бальзы $KKK \geq 300$ ($10 \leq R_p \leq 25$ МПа при $60 \leq \rho_m \leq 160$ кг/м³).

Анизотропность древесины, обусловленная ее волокнистой структурой, существенно влияет на выбор технологических решений, принимаемых с целью придания прозрачности древесине. Важнейшими элементами микроструктуры древесного материала являются ориентированные вдоль оси ствола гидрофильные микрофибриллы целлюлозы (рис. 1).



Рис. 1. Модель строения оболочки стенки клеток древесины [4]

Располагаясь в стенках клеток, они окаймляют свободные полости, заполненные воздухом и (или) водой в зависимости от равновесной влажности эксплуатируемых конструкций. Развитая капиллярно-пористая структура ($60 \leq P_{\text{общ}} \leq 95$ %) обеспечивает широкие возможности модификации древесины путем пропитки с целью придания новых функциональных качеств. В более широком аспекте высокая впитывающая способность позволяет рассматривать древесину в качестве подходящего субстрата для выработки на этой основе узкофункциональных материалов с уникальным сочетанием свойств.

Лиственные и хвойные породы существенно различаются по типу клеток, образующих водопроводящие каналы. Для первых эту функцию выполняют трахеиды и волокна либриформа, а для листовых пород внутренний массоперенос обеспечивают сосуды. Рассеянно-сосудистые листовые породы (береза, осина, липа) отличаются равномерным распределением водопроводящих субструктур как по среднему

диаметру, так и по годичному слою, что позволяет рассматривать их в качестве наиболее перспективных. В радиальном направлении массоперенос интенсифицируется при наличии сердцевинных лучей. Полости клеток, имеющие сравнительно крупные поперечные размеры (10...100 мкм), соединены между собой порами и формируют в древесине капиллярную систему, обладающую проводимостью вдоль волокон и значительно меньшей – поперек (коэффициент влагопроводности вдоль и поперек волокон различается в 15...20 раз).

Плотность потока влаги, проходящей через древесину, пропорциональна градиенту влагосодержания du и коэффициенту влагопроводности (α' , м²/с):

$$i = -\alpha' \rho_0 \frac{du}{dx}, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность древесины в сухом состоянии, кг/м³.

Величина коэффициента влагопроводности определяет способность и интенсивность процесса пропитки древесины. В общем случае параметр α' зависит от плотности породы, температуры, местоположения образца по сечению, направления перемещения влаги. Наиболее существенное влияние на коэффициент влагопроводности оказывает температура, что обусловлено увеличением диффузии водяного пара и снижением вязкости жидкости в капиллярах. Зависимость величины α' в радиальном и тангенциальном направлении имеет вид

$$\alpha_p = \alpha_m \cdot [1 + 0,02 \cdot A], \quad (2)$$

где A – объем сердцевинных лучей в древесине, %.

На микроуровне клеточные стенки имеют слоистое строение, их базовым элементом являются нитевидные фибриллы диаметром 3 нм, формирующие следующий масштабный уровень – лентоподобные микрофибриллы со средним размером 10...30 нм, ориентированные преимущественно вдоль оси клетки под небольшим углом. В результате образуется сложная макроструктура целлюлозного каркаса стенки клеток, дополнительно включающая низкомолекулярную гемицеллюлозу, лигнин и адсорбционно-связанную воду.

Очевидными физическими препятствиями на пути прохождения света по структуре древесины являются преобразование углового распределения потока на границах фаз клетки («стенка – полость»). Таким образом, непрозрачность древесины является следствием сильного рассеяния света в видимом диапазоне, что обусловлено анизотропной мезопористой структурой материала. В связи с этим очевидно, что свет легче проходит сквозь древесину параллельно волокнам, т.е. вдоль оси ствола (рис. 2).

Поскольку целлюлоза и гемицеллюлоза практически бесцветны, химическая составляющая эффекта непрозрачности древесины обусловлена наличием в составе лигнина, танинов и смол молекул с хромофорными группами, активно поглощающими свет. По имеющимся данным, вклад лигнина достигает 80...95 % от суммарного поглощения света древесиной [3]. Технологии получения прозрачной древесины различаются в зависимости от применяемых режимов и реагентов. Общим в известных решениях является удаление лигнина с последующей пропиткой светопрозрачным полимером, при этом наиболее подходящими являются заготовки толщиной от 0,3 до 10 мм [3, 5, 6].

Для перевода макромолекул природного лигнина с высоким содержанием ароматических субъединиц в растворимое состояние и удаления из древесины требуется разрушение трехмерной сетки с помощью сильного химического воздействия. Промышленные отбеливатели строительных материалов, включая древесину, химически растворяют окрашивающие соединения способами:

– окисления молекул хромофора посредством нуклеофильной атаки с разрывом химических связей. Так воздействуют реагенты на основе хлора (NaClO_2 , NaClO , $\text{Ca}(\text{ClO})_2$), NH_2Cl и др.) или кислородных анионов (H_2O_2 , $\text{Na}_2\text{H}_3\text{CO}_6$, $\text{Na}_2\text{H}_4\text{B}_2\text{O}_8$, KMnO_4) [5];

– восстановления молекул хромофора за счёт преобразования двойных связей в одинарные с потерей эффекта поглощения света (реагенты на основе SO_2).

В эксперименте, описанном в [5], авторы обрабатывали древесину 5 %-м водным раствором гипохлорита натрия в течение 1...2 суток, чтобы удалить красящие вещества, включая лигнин. В исследовании [3] использовали традиционные химикаты и процессы, применяемые в технологии варки бумажной массы. Лигнин удаляли путем кипячения в течение 12 часов в растворе NaOH и Na_2SO_3 с последующей обработкой пероксидом водорода (H_2O_2) для отбеливания. Раствор реагента готовили путем растворения NaOH (2,5М) и Na_2SO_3 (0,4 М) в дистиллированной воде. Срезы древесины погружали в раствор для удаления лигнина и кипятили в течение 12 часов, затем промывали горячей дистиллированной водой. На заключительном этапе деревянные блоки помещали в отбеливающий раствор H_2O_2 (2,5 М) и нагревали до 90...100 °С. Образцы, из которых удален лигнин, были сохранены в этаноле. Размер контрольных образцов из древесины липы составлял 50×50×3 мм.

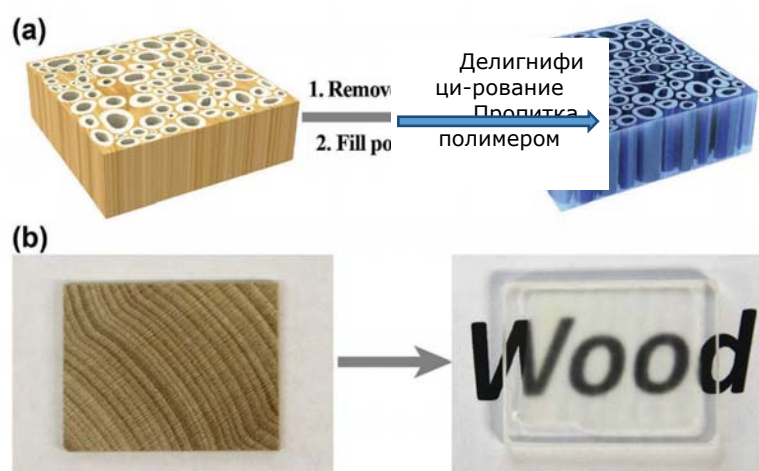


Рис. 2. Схема модифицирования капиллярно-пористой структуры природной древесины для получения светопрозрачного конструкционного материала [3]

Загребин Е.А. и Ведерников К.Е. производили варку древесины в течение 3 ч при атмосферном давлении в водном растворе, содержащем NaOH (1,75 М) и Na_2SO_3 (0,2 М) [7]. Снижение концентрации лигнина достигало 44,20 % от массы древесины (≈ 90 % от исходного содержания). Средняя плотность обработанной таким образом древесины снизилась на 15,2 %. Удаление части лигнина, который выполняет функцию связующего и матричного материала, объединяющего и упрочняющего волокнистую микроструктуру, сопровождается уменьшением прочности клеточной стенки – основного элемента несущего каркаса в капиллярно-пористой системе древесины. В связи с этим субстрат, формируемый после химической обработки, можно рассматривать как своеобразный трехмерный препрег, состоящий из целлюлозных волокон объемного плетения, образующих открыто пористые структуры, широко применяемые в технологии каркасных композиционных материалов. Формируемые на основе целлюлозного каркаса биокompозиты (БКМ) достигают максимальной прочности, когда волокна ориентированы в направлении нагружения, и представляют большой интерес в силу их биоразлагаемости и экологичности для окружающей среды [8].

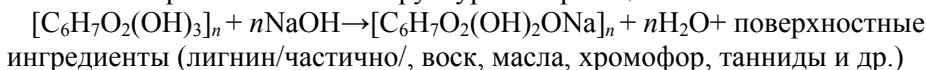
Ориентация волокон определяет конечную прочность и жесткость биокompозита. В преломлении к технологии получения прочных и долговечных прозрачных БКМ правильный подбор химических отбеливающих реагентов чрезвычайно важен. Он позволяет достичь существенного роста прочностных показателей за счет химической модификации состава природного волокна. Поэтому на начальном этапе исследований целесообразно выбрать щелочную химическую обработку (мерсеризацию), которая давно и успешно применяется для модифицирования натуральных волокон [9]. При такой обработке гидрофобные экстрактивные вещества (масло, воск), а также лигнин,

покрывающие поверхность стенки натуральных волокон, вымываются. Это повышает способность обработанных волокон к смачиванию материалом связующего и прочность конечного композита:

$$\sigma_{\text{км}} = \frac{2\tau l_{\text{кр}}}{d_{\text{в}}} V_{\text{в}} + (1 - V_{\text{в}}) \sigma_{\text{м}}, \quad (3)$$

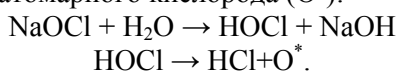
где $V_{\text{в}}, l_{\text{кр}}, d_{\text{в}}$ – объемная степень наполнения, критическая длина и диаметр микрофибрилл в БКМ; τ – прочность адгезионного слоя «матрица-наполнитель»; $\sigma_{\text{м}}$ – прочность полимерной матрицы.

Взаимодействие щелочи с целлюлозой приводит к образованию щелочной целлюлозы с измененной кристаллической структурой по реакции



Дополнительно щелочной реагент (NaOH) реагирует с натуральными волокнами с эффектом деполимеризации целлюлозы, обнажая более короткие кристаллиты. Она удаляет большую часть влаги и обнажает микрофибриллы, так что между волокном и материалом матрицы увеличивается величина адгезионного контакта (τ). При кратковременной щелочной обработке натуральных волокон достигается значительное улучшение удельной прочности и прочности при растяжении [4].

Вторым возможным (конкурирующим) вариантом реализации процесса получения древесного субстрата является химическое отбеливание древесины с помощью HClO и $\text{Ca}(\text{OCl})_2$. Отбеливающая способность гипохлоритов натрия и кальция обусловлена способностью разрушать структурные группы в органических соединениях, которые обуславливают избирательное поглощение света (ароматических хромофоров). В водной среде гипохлорит натрия сначала гидролизует, а затем продукты реакции распадаются с образованием атомарного кислорода (O^*):



Атомарный кислород способен разрывать прочные ковалентные химические связи в молекулах природного красителя.

Полимер влияет на механическую прочность и прозрачность БКМ. Предпочтительно выбирать синтетические смолы, имеющие в отвержденном состоянии показатель преломления от 1,4 до 1,6 (акриловая, эпоксидная, полиэфирная смолы).

Важным аспектом технологической цепочки является качественное насыщение пористой структуры субстрата матричным веществом. Эффективные приёмы (горяче-холодные ванны, «вакуум-давление-вакуум») разработаны в технологии защитной пропитки древесины. Первый отличается легкостью применяемого оборудования и малой энергоёмкостью, однако способ «вакуум-давление-вакуум» обеспечивает сквозную пропитку тонких пиломатериалов.

Поэтому на начальном этапе предлагается использовать алгоритм, предусматривающий импрегнацию полимера (прозрачная эпоксидная смола и бесцветный отвердитель) в микроструктуру древесины под вакуумом. Для этого субстрат отбеленной древесины погружается в смолу, после чего следует трехкратное вакуумирование и девакуумирование. Оптимальным остаточным давлением для дегазации эпоксидной смолы является остаточное давление 150...200 Па при продолжительности процесса 2...5 мин. После сброса вакуума смола эффективно заполняет освобождённую от газа микроструктуру древесины под атмосферным давлением. Общая продолжительность процесса пропитки определяется жизнеспособностью смолы и не должна превышать 20...30 мин. Пропитанный смолой образец древесины затвердевает в течение 34 часов.

Выводы

Ежегодная возобновляемость, экологичность, высокие механические и теплофизические свойства делают древесный ресурс уникальным сырьем для выработки натуральных волокнистых 3D-субстратов в рамках технологии получения биокомпозитов.

Природная анизотропность микроструктуры обеспечивает необычное сочетание свойств в зависимости от угла наклона материала, включая светопроницающую способность элементов конструкций.

Прозрачная древесина имеет широкий потенциал использования: от деревянной мебели и декоративных элементов интерьера до конструкционных материалов в транспорте, оптоэлектронике и солнечной энергетике.

Щелочная обработка целлюлозных волокон позволяет совместить эффекты их упрочнения и обесцвечивания, необходимые для получения прозрачных биокompозитов.

Прозрачность композиционного материала возможна при использовании свето-прозрачных эпоксидных смол с низкой вязкостью. При этом для качественной пропитки целесообразно использовать циклическое воздействие по режиму «вакуум-давление-вакуум» при остаточном давлении 150...200 Па.

Список литературы

1. Матвеев, С.М. Подходы и предложения к определению и выполнению расчетной лесосеки в Российской Федерации / С.М. Матвеев, А.Н. Водолажский, А.В. Мироненко // Лесотехнический журнал. – 2019. – №3 (35).
2. RU 2 755 823 C2. Прозрачная древесина и способ её получения.
3. Mingwei, Zhu. Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites / Zhu Mingwei, Song Jianwei, Li Tian // *Advanced Materials*. – 2016. – 26. – P.5181–5187.
4. Mohanty, A.K. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview / A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal // *Compos. Interfaces*. – 2001 – Vol. 8, No. 5 – P. 313–343.
5. Mayer, Robert J. Nucleophilic Reactivities of Bleach Reagents / Robert J. Mayer, Armin R. Ofial // *Organic Letters*. – 2018. – 20. – P. 2816–2820.
6. Fink Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics и Technology of Wood. – 1992. – 46 p.
7. Загребин, Е.А. Особенности делигнификации древесины березы повислой (*Betula pendula* L.) методами микодеструкции и сульфитной щелочной варки / Е.А. Загребин, К.Е. Ведерников // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2022. – Т. 26, № 6. – С. 141–147. – DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-141-147.
8. Prajapati, H. Advances in Natural-Fiber-Reinforced Composites: A Topical Review / H. Prajapati, A. Tevatia, A. Dixit // *Mech Compos Mater*. – 2022. – 58. – P. 319–354. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10033-2>
9. Li, X. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiberreinforced composites: A review / X. Li, L.G. Tabil, S. Panigrahi // *J. Polym. Environ*. – 2007 – Vol. 15, No. 1. – P. 25–3.

References

1. Matveev, S.M. Approaches and proposals for determining and implementing the estimated cutting area in the Russian Federation / S.M. Matveev, A.N. Vodolazhsky, A.V. Mironenko // *Forestry journal*. – 2019. – No. 3 (35).
2. RU 2 755 823 C2. Transparent wood and the method for obtaining it.
3. Mingwei, Zhu. Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites / Zhu Mingwei, Song Jianwei, Li Tian // *Advanced Materials*. – 2016. – 26. – P.5181–5187.
4. Mohanty, A.K. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview / A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal // *Compos. Interfaces*. – 2001 – Vol. 8, No. 5 – P. 313–343.
5. Mayer, Robert J. Nucleophilic Reactivities of Bleach Reagents / Robert J. Mayer, Armin R. Ofial // *Organic Letters*. – 2018. – 20. – P. 2816–2820.
6. Fink Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics и Technology of Wood. – 1992. – 46 p.

7. Zagrebin, E.A. Features of delignification of silver birch wood (*Betula pendula* L.) by mycodestruction and sulfite alkaline cooking methods / E.A. Zagrebin, K.E. Vedernikov // Forestry Bulletin. – 2022. – Vol. 26, No. 6. – P. 141–147. – DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-141-147.

8. Prajapati, H. Advances in Natural-Fiber-Reinforced Composites: A Topical Review / H. Prajapati, A. Tevatia, A. Dixit // Mech Compos Mater. – 2022. – 58. – P. 319–354. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10033-2>

9. Li, X. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiberreinforced composites: A review / X. Li, L.G. Tabil, S. Panigrahi // J. Polym. Environ. – 2007 – Vol. 15, No. 1. – P. 25–3.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION AND QUALITY MANAGEMENT

УДК 005.62

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

Крамор Диана Дмитриевна,
студентка
E-mail: kramordiana@gmail.com

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

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

Kramor Diana Dmitrievna,
Student
E-mail: kramordiana@gmail.com

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Assistant Professor of the
Department «Management of Quality and
Technology of Construction Production»
E-mail: maksimovain@mail.ru

СТАТИСТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММЫ ПАРЕТО НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЖАРОЧНОГО ШКАФА

Д.Д. Крамор, И.Н. Максимова

Статистическое регулирование осуществляют с помощью большого количества различных инструментов, одним из которых является диаграмма Парето. Рассмотрено применение диаграммы Парето при верификации закупленной продукции для дальнейшего изготовления электрического жарочного шкафа встраиваемого. Анализ построенной диаграммы Парето показал, что три дефекта стали тонколистовой оцинкованной из девяти составили почти 80 % брака.

Ключевые слова: статистические методы, диаграмма Парето, жарочный шкаф, дефекты

STATISTICAL REGULATION USING THE PARETO DIAGRAM ON THE EXAMPLE OF PRODUCTION ELECTRIC FRYING PAN

D.D. Kramor, I.N. Maksimova

Statistical regulation is carried out using a large number of different tools, one of which is the Pareto diagram. The application of the Pareto diagram in the verification of purchased products for the further manufacture of an electric built-in frying pan is considered. An analysis of the constructed Pareto diagram showed that three defects in galvanized sheet steel out of nine accounted for almost 80 % of the defects.

Keywords: statistical methods, Pareto diagram, frying pan, defects

Качество всегда было и продолжает оставаться одной из ключевых составляющих конкурентоспособности, именно поэтому анализ качества продукции – это одна из важнейших составляющих любого производства [1]. Неотъемлемой частью анализа качества является статистическое регулирование, которое, в свою очередь, содержит в себе целый ряд различных инструментов [2, 3]. Одним из инструментов статистического контроля является диаграмма Парето – простой графический метод, предусматривающий ранжирование всех потенциальных областей или источников изменчивости (вариаций) в соответствии с их вкладами в стоимость или полную изменчивость. Обычно небольшое число источников определяет большую часть изменчивости (или стоимости), так что усилия для решения проблемы следует концентрировать на главных источниках, временно игнорируя «второстепенное большинство» [4].

Диаграмма Парето представляет собой упорядоченную нисходящую гистограмму, которая используется в различных отраслях (оценка бизнеса, оценка уровня качества). Закон Парето строится на «принципе 80/20»; в сфере контроля качества он означает то, что лишь 20 % всех факторов являются причиной 80 % брака.

При оценке качества диаграмму Парето чаще всего используют на этапе верификации. Суть данного инструмента в таком случае – выделение важнейших дефектов закупленной продукции из целого ряда возможных дефектов. Определение важнейших дефектов позволяет сконцентрироваться на их устранении, не тратя время на устранение незначительных.

На примере производства электрического жарочного шкафа рассмотрим использование диаграммы Парето. Анализ проводился на примере стали тонколистовой оцинкованной, так как она является одним из основных элементов при изготовлении основной части электрошкафа – фасада.

Результаты данных контроля приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты данных верификации стали тонколистовой оцинкованной

№ дефекта	Наименование дефекта	Количество дефектов
1	Сквозные разрывы	2
2	Несоответствие внешнего вида покрытия	36
3	Не выдержана толщина покрытия	11
4	Надав	45
5	Наплывы цинка	8
6	Непроцинковка	5
7	Отпечатки	23
8	Царапина	50
9	Коробоватость	20

Для выявления главной проблемы, связанной с возникновением дефектов, был проведен анализ с помощью диаграммы Парето, состоящий из нескольких этапов.

Вначале было посчитано общее количество дефектов, которое составило 200. После этого необходимо было выявить процент, который составляет каждый дефект в отдельности, полученные проценты для каждого несоответствия представлены в табл. 2.

Все несоответствия были проранжированы в порядке убывания, и затем был определен накопленный процент (табл. 3).

На основе полученных результатов была построена диаграмма Парето для стали тонколистовой оцинкованной (см. рисунок).

Анализ представленной диаграммы показывает, что наиболее важными для производства являются такие дефекты, как царапина, надав и несоответствие внешнего вида покрытия.

Т а б л и ц а 2

Относительное количество дефектов

№ дефекта	Наименование дефекта	Количество дефектов, шт.	Количество дефектов, %
1	Сквозные разрывы	2	1
2	Несоответствие внешнего вида покрытия	36	18
3	Не выдержана толщина покрытия	11	5,5
4	Надав	45	22,5
5	Наплывы цинка	8	4
6	Непроцинковка	5	2,5
7	Отпечатки	23	11,5
8	Царапина	50	25
9	Коробоватость	20	10
Сумма		200	100

Т а б л и ц а 3

Вычисление накопленного процента дефекта

№	Наименование дефекта	Количество дефектов, %	Накопленный %
1	Царапина	25	25
2	Надав	22,5	47,5
3	Несоответствие внешнего вида покрытия	18	65,5
4	Отпечатки	11,5	77
5	Коробоватость	10	87
6	Не выдержана толщина покрытия	5,5	92,5
7	Наплывы цинка	4	96,5
8	Непроцинковка	2,5	99
9	Свонные разрывы	1	100

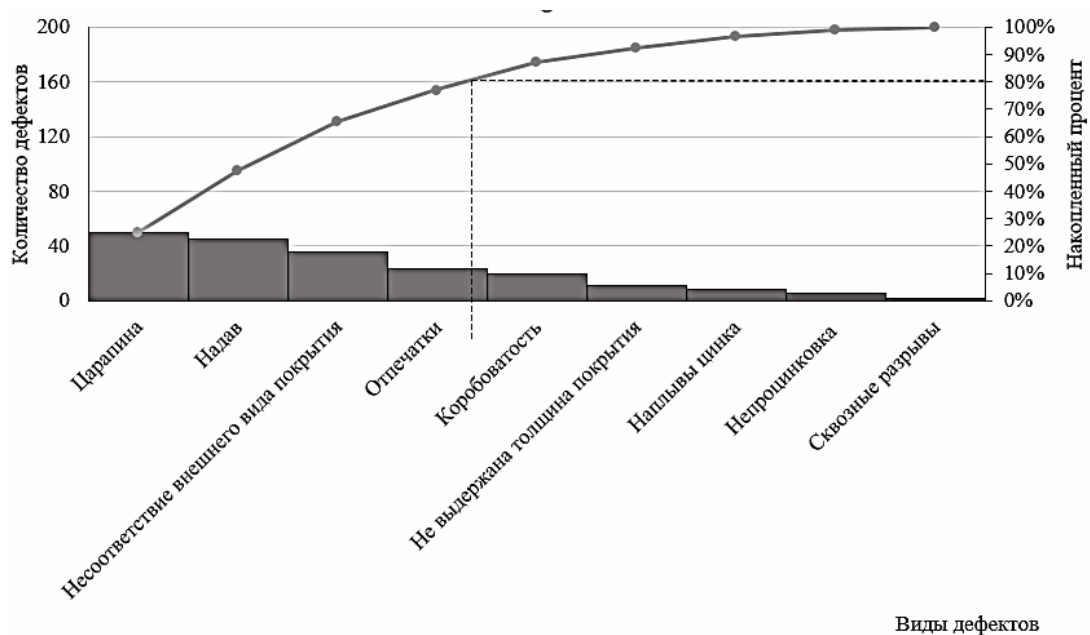


Диаграмма Парето

Таким образом, установлен первый уровень требований, исходя из базовых потребностей (подразумеваемых ожиданий потребителя). Далее, по мере уточнения, выходим на второй уровень, выводя из начальных требований более подробные показатели, затем переходим на следующий уровень и определяем показатели, критичные для качества [4].

В нашем случае:

- а) основная потребность: «надлежащая доставка»;
- б) требования первого уровня: «сроки доставки», «хорошее состояние доставляемого товара»;
- в) критичные параметры: «перевозчик», «дата доставки», «упаковка товаров», «комплектность» и т. д.

Проанализировав возможные причины появления данных несоответствий, был сделан вывод о необходимости более тщательной упаковки листов стали при перевозке поставщиком, так как чаще всего данные несоответствия появляются именно в процессе доставки.

Список литературы

1. Макарова, Л.В. Анализ эффективности инструментов контроля и обеспечения качества продукции / Л.В. Макарова, А.Н. Переселкова, А.Е. Феоктистова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2022. – № 4 (41). – С. 152–161.
2. Крамор, Д.Д. Статистическое регулирование с помощью контрольных карт на примере производства электрического жарочного шкафа / Д.Д. Крамор, И.Н. Максимова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2024. – № 1 (18). – С. 63–69.
3. Максимова, И.Н. Применение инструментов качества – диаграммы Исикавы, диаграммы сродства, QFD-анализа – на примере производства электрического жарочного шкафа / И.Н. Максимова, Д.Д. Крамор // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2023. – № 2 (17). – С. 70–77.
4. ГОСТ Р ИСО 13053-2–2015. Статистические методы. Количественные методы улучшения процессов «Шесть сигм». Часть 2. Методы. – М.: Росстандартинформ, 2016. – 43 с.

References

1. Makarova, L.V. Analysis of the effectiveness of tools for product quality control and assurance / L.V. Makarova, A.N. Perestrokova, A.E. Feoktistova // Education and science in the modern world. Innovation. – 2022. – No. 4 (41). – P. 152–161.
2. Kramor, D.D. Statistical regulation using control cards on the example of the production of an electric frying pan / D.D. Kramor, I.N. Maksimova // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2024. – No. 1 (18). – P. 63–69.
3. Maksimova, I.N. The use of quality tools – Ishikawa diagrams, affinity diagrams, QFD analysis – on the example of the production of an electric frying pan / I.N. Maksimova, D.D. Kramor // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2023. – No. 2 (17). – P. 70–77.
4. GOST R ISO 13053-2–2015. Statistical methods. Quantitative methods for improving Six Sigma processes. Part 2. Methods. – M.: Rosstandartinform, 2016. – 43 p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND SOFTWARE PACKAGES

УДК 004.94

*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

Лысый Сергей Петрович,

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Начертательная геометрия и графика»
E-mail: lisy.sergey2018@yandex.ru

Толушов Сергей Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
проректор по учебной работе
E-mail: tsa@pguas.ru

Абдуллаев Джалил Абдулфайзович,

студент
E-mail: Jalilabduloev337@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

Lisy Sergey Petrovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the
Department «Descriptive Geometry and
Graphics»

E-mail: lisy.sergey2018@yandex.ru

Tolushov Sergey Aleksandrovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor,
Vice-Rector for Academic Affairs
E-mail: tsa@pguas.ru

Abdullaev Jalil Abdulfayzovich,

Student
E-mail: Jalilabduloev337@gmail.com

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ В AUTOCAD: ОТ ИДЕИ ДО РЕАЛИЗАЦИИ

С.П. Лысый, С.А. Толушов, Д.А. Абдуллаев

Представлены функциональные возможности 2D- и 3D-моделирования, интерфейс программы AutoCAD. Проиллюстрированы примеры графических работ, выявлены и проанализированы преимущества, а также недостатки данной системы. AutoCAD позволяет архитекторам и инженерам визуализировать и создавать сложные проекты в трехмерном пространстве, проводить анализ различных конструктивных решений.

Ключевые слова: проектирование, интерфейс, графическая работа, набор инструментов

3D MODELING IN AUTOCAD: FROM IDEA TO IMPLEMENTATION

S.P. Lisy, S.A. Tolushov, D.A. Abdullaev

The functionality of 2D- and 3D-modeling, the interface of the AutoCAD program are shown. Examples of graphic works are illustrated, the advantages and disadvantages of this system are

identified and analyzed. AutoCAD allows architects and engineers to visualize and create complex projects in three-dimensional space, to analyze various design solutions.

Keywords: design, interface, graphic work, set of tools

Первая версия программы AutoCAD была выпущена в 1982 году американской компанией Autodesk. На тот момент программа была доступна для многих компаний и позволяла инженерам разрабатывать детализированные чертежи. AutoCAD хорошо зарекомендовала себя в строительстве, архитектуре, машиностроении и других отраслях промышленности. В России AutoCAD применяется как эффективный инструмент для решения сложнейших задач проектирования. Базовый функционал программы технически совершенствуется, что, в свою очередь, создает трудности для ее освоения начинающими специалистами. Набор инструментов AutoCAD позволяет инженеру значительно упростить работу и снизить количество затраченного на проект времени. В большинстве случаев для выполнения 85–90 % задач проектирования требуется всего 20–25 % от исходного количества инструментов на ленте, поскольку в рабочем пространстве есть множество вспомогательных инструментов, которые не всегда используются проектировщиком [1, 2].

Самостоятельное изучение программы AutoCAD студентами очного отделения не всегда дает положительные результаты при защите курсовых работ и проектов. Поэтому необходимо изучение базового функционала программы AutoCAD на практических занятиях по инженерной и компьютерной графике.

На занятиях по AutoCAD перед студентами были поставлены следующие задачи:

- проанализировать достоинства и недостатки AutoCAD;
- рассмотреть основные инструменты и операции при работе с программой;
- разработать планы жилых домов.

В процессе ознакомления с AutoCAD студенты выявили следующие основные преимущества:

- функциональность программы;
- удобные инструменты для трехмерного моделирования;
- работа с большими чертежами и сложными проектами;
- создание точных и сложных чертежей;
- красочный и понятный интерфейс;
- совместимость с множеством других графических программ;
- гибкость настроек.

К основным недостаткам AutoCAD относятся:

- высокая стоимость лицензии;
- сложность программы;
- затраты времени на обучение;
- высокие системные требования при работе с программой.

Разработка трехмерной модели осуществляется по заранее разработанному эскизу или чертежу с применением специальных инструментов визуализации и аппаратных устройств в виде планшета, компьютера или другой оргтехники.

В процессе создания чертежей студентами были изучены такие инструменты программы, как точка, линия, дуга, окружность, ввод текста и другие элементы. В работе студентами применялись такие операции, как редактирование, копирование, масштабирование и др. Сохранение чертежа в AutoCAD осуществлялось в формате DWG. Для ускорения процесса проектирования в AutoCAD студентами применялись клавиши Esc, Enter, Del, F1-F12, CTRL +... и т.д.

На рис. 1 приведен план первого и второго этажей жилого дома – проекта, над которым студенты работали на практических занятиях.

В работе над проектом студентами выполнялось точное построение, основанное на использовании объектных привязок и операции ввода координат. В рамках практического занятия были изучены абсолютная и относительная системы координат. В абсолютной системе все координаты точек объектов задаются относительно начала координат. В относительной системе координаты задаются от последних точек. Это

удобно при построении прямоугольников: можно сразу задать длину и ширину. Существуют два способа ввода координат: с помощью командной строки и динамический ввод. Последний способ отличается более высоким удобством и скоростью построения, нежели командная строка. В ходе работы над проектами встречались повторяющиеся элементы: окна, двери, проемы, шахты и др. Для ускорения создания чертежа в AutoCAD студенты превращали данные элементы в блоки [3, 4].

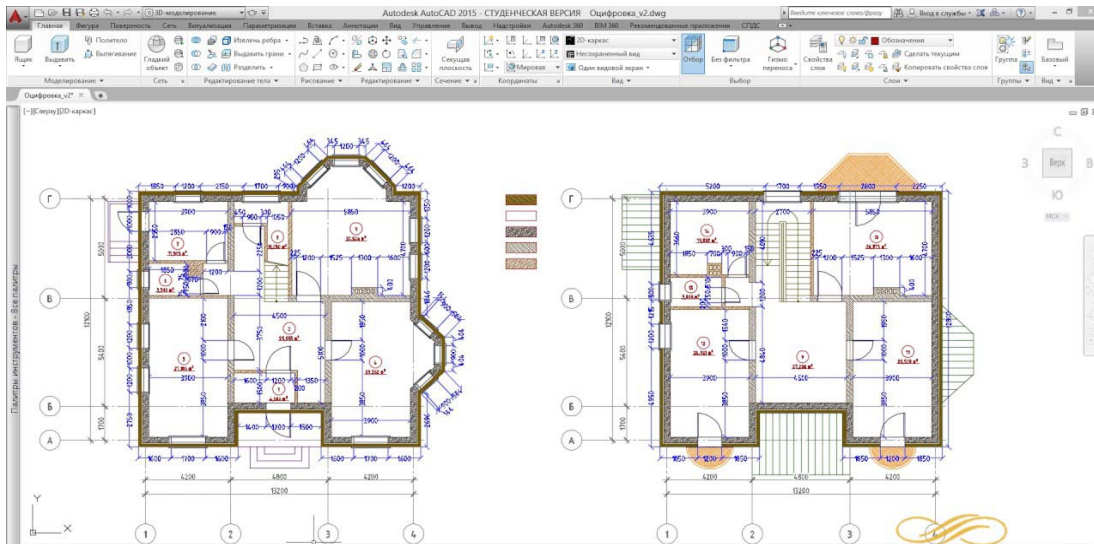


Рис. 1. План первого и второго этажа жилого дома

На рис. 2 приведен план двухэтажного жилого дома – очередной этап практической работы.

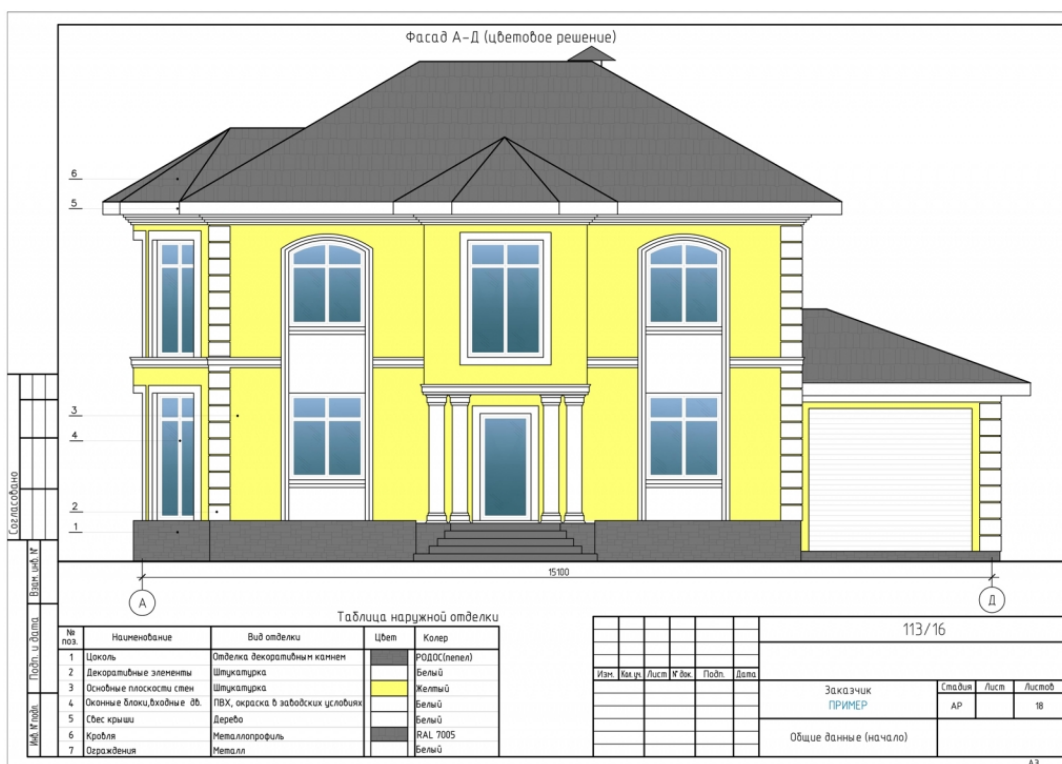


Рис. 2. План двухэтажного жилого дома

В результате проектирования студенты подготовили библиотеку блоков, настроили шаблоны, систему наименования слоев, типы линий, научились создавать твердотельные объекты различного уровня сложности, применяя операции пересечения,

объединения и вычитания, настраивать вес линий. Соблюдая ряд последовательных действий, освоили перевод чертежей из 2D в 3D. Таким образом, студенты выполнили задачи проектирования и поняли принцип построения уникальной геометрии.

На рис. 3 приведен план жилого дома.

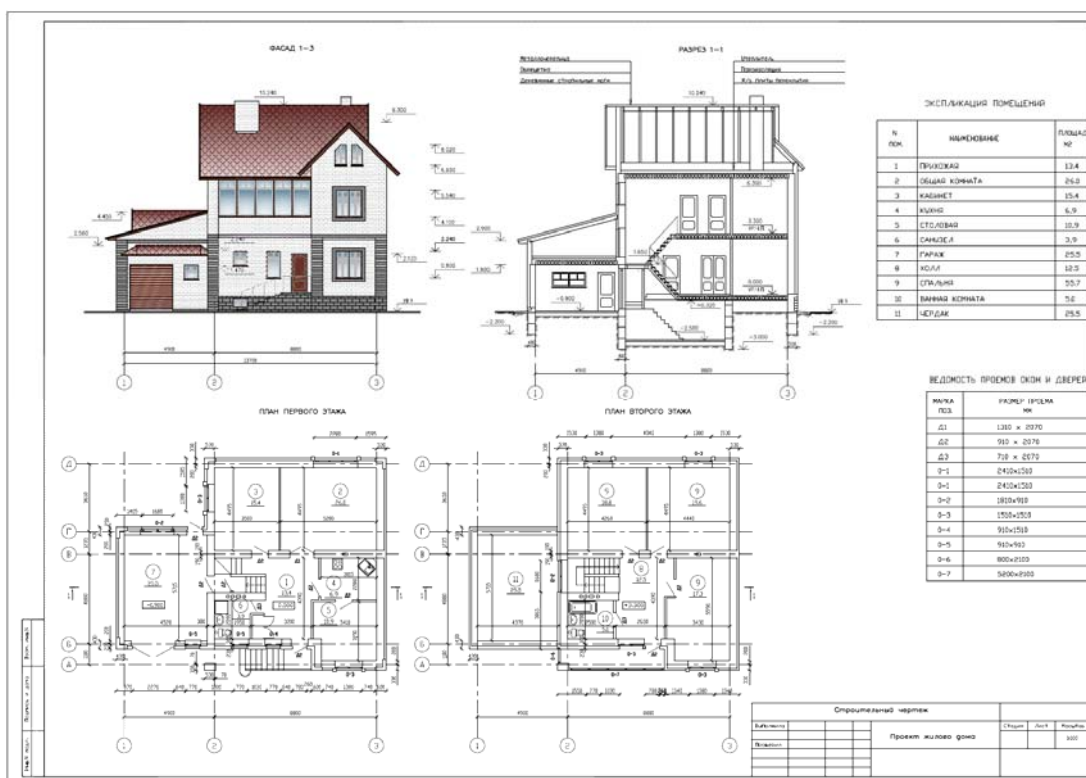


Рис. 3. План жилого дома

Таким образом, программа AutoCAD может быть использована специалистами различных сфер деятельности, например в архитектуре, в ландшафтном дизайне, геодезии и др. Вне зависимости от области применения функционал работы программы остается неизменным. AutoCAD позволяет эффективно и точно реализовать всевозможные идеи проекта.

Вывод. Приведены функциональные особенности 2D- и 3D-моделирования в программе AutoCAD. Рассмотрен интерфейс программы AutoCAD. Для демонстрации возможностей программы представлены примеры графических работ. Данный инструмент позволит инженерам создавать объемные чертежи и 3D-модели, использовать всевозможные инструменты моделирования, а также разрабатывать проекты различной степени сложности.

Список литературы

1. Гаврилов, М.А. Компьютерная графика. Лабораторный практикум по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» / М.А. Гаврилов. – Пенза: ПГУАС, 2017. – 133 с.
2. Чопова, Н.В. Применение программы AutoCAD в процессе обучения студентов начертательной геометрии / Н.В. Чопова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 5–3 (119). – С. 128–136.
3. Осадчий, Д.Ю. Повышение эффективности усвоения программы AutoCAD / Д.Ю. Осадчий // Математическое моделирование и информационные технологии. Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) НТК студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции: в 6 т. – 2020. – С. 103.

4. Булгаков, Д.М. Применение программы AutoCAD в инженерной графике / Д.М. Булгаков // Инновационные научные исследования. – 2021. – № 4–1 (6). – С. 83–88.

References

1. Gavrilov, M.A. Computer graphics. Laboratory workshop on the preparation of 08.03.01 «Construction» / M.A. Gavrilov. – Penza: PGUAS, 2017. – 133 p.

2. Chopova, N.V. Application of the AutoCAD program in the process of teaching students descriptive geometry / N.V. Chopova // International Scientific Research Journal. – 2022. – № 5–3 (119). – P. 128–136.

3. Osadchy, D.Y. Improving the efficiency of mastering the AutoCAD program / D.Y. Osadchy // Mathematical modeling and information technologies. The fifteenth All-Russian (seventh International) NTC students, postgraduates and young scientists: conference materials: In 6 vol. – 2020. – P. 103.

4. Bulgakov, D.M. Application of the AutoCAD program in engineering graphics / D.M. Bulgakov // Innovative scientific research. – 2021. – № 4–1 (6). – P. 83–88.